

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Teppo Punkkinen

Aurinkopaneelien maateline

Opinnäytetyö 2017

Tiivistelmä

Teppo Punkkinen

Aurinkopaneelien maataline, 55 sivua, 7 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2017

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, Saimaan ammattikorkeakoulu, pääsuunnittelija

Lasse Rätty, GreenEnergy Finland Oy

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella GreenEnergy Finland Oy:lle aurinkopaneelien maataline.

Työssä käydään läpi tuulikuormien määrittäminen eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 mukaan ja lumikuorman määrittäminen eurokoodin SFS-EN 1991-1-3 mukaan. Kokonais-tuulikuorman määrittäminen maatalineelle käydään läpi käyttäen nettopaineenkertoimia ja kokonaisvoimakertoimia.

Työssä on tutkittu maatalineelle mahdollisia ratkaisuja liitostyypeille, jäykistysmenetelmälle, pintakäsittelylle ja sauvojen ja palkkien poikkileikkauksille. Näistä tutkittiin parhaiten soveltuvia ratkaisuja, analysoinnin ja optimoinnin avulla.

Kuormien laskentaan ja osien ja sauvojen mitoittamiseen käytettiin Exceliä ja käsin laskentaa. Rakenteiden rasitukset ratkaistiin käyttäen Jigi-suunnitteluohjelmistoa.

Avainsanat: maataline, teräsrakenne, tuotekehitys

Abstract

Teppo Punkkinen

Solar panel ground mount, 55 pages, 7 appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Civil and Construction Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2017

Instructor(s): Lecturer Petri Himmi, Saimaa University of Applied Sciences,
Lead Design Engineer Lasse Rätty, GreenEnergy Finland Ltd.

The purpose of this study was to design a solar panel ground mount for GreenEnergy Finland Ltd.

The thesis covers wind and snow load determination according to Eurocodes SFS-EN 1991-1-4 and SFS-EN 1991-1-3. The wind actions for the ground mount are calculated using both, the overall force coefficients and the net pressure coefficient.

This thesis contains the research of possible solutions for types of joints, stiffening, surface treatments and cross-sections for beams and axial stress members for solar panel ground mount.

The load determination and dimensioning of parts and steel members were done by using Excel and hand calculations. The stresses of the structure were solved with Jigi structural design -software.

Keywords: ground mount, steel structure, product development

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Aurinkopaneelien maatalineet.....	6
3	Telineiden kuormat	7
3.1	Tuulikuorma	8
3.1.1	Tuulennopeuden perusarvo	8
3.1.2	Tuulennopeuden modifioitu perusarvo	9
3.1.3	Tuulenpuuskien intensiteetti	15
3.1.4	Puuskanopeuspaine.....	15
3.1.5	Tuulen ominaiskuorma	16
3.1.6	Rakennekerroin	20
3.2	Lumikuorma	20
4	Kuormitusyhdistelmät ja rajatilat	23
4.1	Kuormitusyhdistelmät.....	23
4.2	Murtorajatila	24
4.3	Käyttörajatila	27
5	Rakenteen valinta	28
5.1	Rakenteen tyyppi	30
5.2	Materiaali ja lujuusluokka.....	33
5.3	Poikkileikkaukset	33
5.3.1	Aksiaalisesti kuormitetut sauvat	35
5.3.2	Taivutetut sauvat	36
5.4	Liitokset.....	36
5.4.1	Aksiaalisesti kuormitetut sauvat	36
5.4.2	Kiinnityskisko.....	39
5.5	Jäykistys	40
5.6	Pintakäsittely.....	42
5.6.1	Kuumasinkitys	43
5.6.2	Korroosionestomaalaus.....	46
5.7	Perustukset.....	48
6	Yhteenveto ja pohdinta	50
	Kuvat.....	52
	Taulukot.....	52
	Lähteet.....	54

Liitteet

- Liite 1. Maatelineen kuormat
- Liite 2. Maatelineen rasitukset
- Liite 3. Sauvojen mitoitus
- Liite 4. Kiskon mitoitus
- Liite 5. Liitosten mitoitus
- Liite 6. Maatelineen yleispiirustus
- Liite 7. Maatelineen osat ja detaljit

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön päätavoitteena on kehittää tilaajalle aurinkopaneelien maateline. Työn keskeisenä sisältönä käydään läpi eurokoodin mukaiset kuormien määrittäykset ja erilaiset rakenneratkaisut. Eurokoodien mukaiset osien mitoitus on esitetty liitteissä.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Suomen johtaviin aurinkovoimaloiden toimittajiin kuuluva GreenEnergy Finland Oy (GEF). GEF on vuonna 2010 perustettu aurinkosähköjärjestelmien asiantuntijayritys, jonka pääliiketoiminta on aurinkosähkö- ja energiatasehallintaratkaisujen kokonaisvaltainen toimitus. Palveluihin sisältyy myös suunnittelu, konsultointi ja rahoitus.

Työ rajattiin koskemaan maastoluokkaan 0, eli avoimen meren äärellä olevalle rannikkoalueelle, sijoitettavaa telinettä, jossa samalla suurin lumikuorma on 3 kN/m^2 . Telineen kallistuskulmaksi on rajattu 30 astetta, jolloin telineiden rivivälit eivät kasva liian suuriksi ja tuulikuorma voidaan määrittää eurokoodin 1991-1-4 mukaan, jossa painekertoimia on annettu 30 asteeseen asti. Telineen on kannettava yhteensä 20 aurinkopaneelia kahdessa rivissä, tämän sopiessa hyvin sähköteknisesti ja paneelien tukirakenne pystyttään asettamaan tasajaollisesti joka toisen paneelien sauman kohdalle. Telineen tulee olla myös helposti kasattavissa ja kuljetettavissa työmailla, jolloin suuria esikokoonpanoja ja työmaa hitsejä tulee välttää.

Työ koskee maahan asetettavaa telinettä, katoilla käytetään yleensä pienempiä ja matalampia telineitä, jolloin tuulikuorma ja sen myötä vastapainot eivät kasva liian suuriksi. Vanhojen rakennusten kattojen kantavuus on yleensä rajoittava tekijä telineen tyypille. Katoilla käytetään myös paljon pollarien päälle asennettavia aurinkopaneelitelineitä, jolloin vastapainoja ei tarvita.

2 Aurinkopaneelien maatelineet

Maatelineellä yleensä tarkoitetaan aurinkopaneelien telinettä, jolla ei ole muunlaista käyttötarkoitusta, kuten esimerkiksi autokatokset tai kävelyteiden ja terassien katerakenteet. Telineet valmistetaan yleensä alumiinista, teräksestä tai näiden yhdistelmistä, harvemmin käytetään myös puuta.

Telineen suuntauksella ja kallistuksella on vaikutus sähkön tuottoon. Suomessa suoraan etelään suunnatut ja kallistukseltaan noin 40 asteen kulmassa olevat telineet tuottavat eniten, mutta pienemmällä kallistuskulmalla paneelit tuottavat sähköä tasaisemmin vuorokauden aikana ja tuotanto painottuu enemmän kesäaikaan. Paneelien suuntauksella voidaan myös vaikuttaa vuorokauden aikana tapahtuvaan sähkön tuottoon, esimerkiksi itään suunnatut paneelit tuottavat enemmän aamulla ja länteen suunnatut tuottavat enemmän iltapäivällä. Suurempi kallistus auttaa myös paneelin pintaa pysymään puhtaana. Telineen soveltumisessa kohteeseen on kuitenkin huomioitava telineen korkeuden ja kallistuksen vaikutus varjostuspituuteen, matalampi ja loivemmin kallistettu teline luo lyhyemmän varjon, jolloin seuraavan rivin teline saadaan asettaa lähemmäksi ja asennusalueelle saadaan enemmän paneeleita. Yhdessä telineessä on yleensä useampia paneeleita päällekkäin, jolloin telineiden riviväli voi kasvaa 7–10 metriin. Maatelineiden kallistuskulmana käytetään yleensä 25–45 astetta. (1.)

Maatelineiden perustuksena käytetään yleensä maaruuveja, betonilaattoja tai -anturoita, maaperän mukaan. Yleensä kivisillä tai sepelialueilla käytetään betonisia perustuksia, maaperän pystyessä kantamaan rakenteen painon ja ruuvipaaluja käytetään alueilla, joilla maaperän kantavuus on ongelma.

Maaperä voi myös vaikuttaa telineen tyyppin valintaan, kuten kuvissa 1 ja 2, joissa kuvan 2 teline on toteutettu yhdellä tuella ja kuvan 1 teline kahdella tuella.



Kuva 1. Maateline kahdella jalalla (2)



Kuva 2. Maateline yhdellä jalalla (3)

3 Telineiden kuormat

Tämän työn mukaiselle aurinkopaneelien maatelineelle voidaan käyttää standardia 1991–1–4 tuulikuorman ja standardia SFS EN 1991–1–3 lumikuorman määrittämiseen. Maatelineille käytetään katoksille annettuja suunnitteluohjeita.

3.1 Tuulikuorma

Rasitusten selvittämiseksi tulee määrittää puuskanopeuspaine, jonka avulla lasketaan tuulikuorma joko perustuksille ja jäykistävälle rungolle tai katteen osille ja kiinnityksille. Työssä käydään läpi tuulikuorman määrittämiseen vaaditut laskentavaiheet standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan. Taulukossa 1 on esitetty vaaditut laskentavaiheet tuulikuorman määrittämiseksi. Tuulikuorman suuruuteen vaikuttaa oleellisesti rakenteen korkeus, sijainti ja maasto-olosuhteet. Katokselle on standardissa annettu suoraan nettopaineenkertoimet $c_{p,net}$, jolloin rakenteelle ei tarvitse erikseen määrittää eri pintojen paineita.

Parametri	Aiheen käsittelykohta
Puuskanopeuspaine q_p	
tuulennopeuden perusarvo v_b	4.2 (2)P
nopeuspainekorkeus z_e	Luku 7
maastoluokka	Taulukko 4.1
puuskanopeuspaineen ominaisarvo q_p	4.5 (1)
tuulenpuuskien intensiteetti I_v	4.4
tuulennopeuden modifioitu perusarvo v_m	4.3.1
pinnanmuotokerroin $c_o(z)$	4.3.3
rosoisuuskerroin $c_t(z)$	4.3.2
Esim. verhouksiin, kiinnikkeisiin ja rakenteen osiin vaikuttava tuulenpaine	
ulkopuolisen paineen kerroin c_{pe}	Luku 7
sisäpuolisen paineen kerroin c_{pi}	Luku 7
nettopaineen kerroin $c_{p,net}$	Luku 7
ulkopuolinen tuulenpaine: $w_e = q_p c_{pe}$	5.2 (1)
sisäpuolinen tuulenpaine: $w_i = q_p c_{pi}$	5.2 (2)
Rakenteiden tuulikuormat, kuten tuulen kokonaisvaikutukset	
rakennekerroin: $c_s c_d$	6
tuulikuorma F_w voimakertoimista laskettuna	5.3 (2)
tuulikuorma F_w painekertoimista laskettuna	5.3 (3)

Taulukko 1. Tuulikuormien määrittämiseen tarvittavat laskentavaiheet ja eurokoodin luvut käsittely kohdille (4, s. 42)

3.1.1 Tuulennopeuden perusarvo

Tuulennopeuden perusarvo v_b saadaan kaavalla 1.

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (1)$$

missä:

c_{dir} on suuntakerroin, jonka suositusarvo on 1,0

c_{season} on vuodenaikakerroin, jonka suositusarvo on 1,0

$v_{b,0}$ on tuulennopeuden modifioimaton perusarvo. Suomessa käytetään arvoa 21 m/s.

Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo $v_{b,0}$ määritetään 10 minuutin keskiarvona, 10 metrin korkeudella ja maastoluokan II mukaisissa olosuhteissa. Tämä arvo vastaa 50 vuoden toistumisaikaa vastaavaa arvoa, eikä se riipu tuulen suunnasta. Suomessa käytettävä arvo pätee kaikilla alueilla, meri- ja tunturialueet mukaan lukien, kun maastoluokan 0 maastokerroin k_r korvataan arvolla 0,18. (5, s. 22; 6, s. 125; 4, s. 32.)

3.1.2 Tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo $v_m(z)$ korkeudella z saadaan kaavalla 2.

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b \quad (2)$$

missä:

$c_r(z)$ on kohdan 3.1.2.2 mukainen rosoisuuskerroin

$c_0(z)$ on kohdan 3.1.2.3 mukainen pinnanmuotokerroin

v_b on tuulennopeuden perusarvo.

3.1.2.1 Rosoisuuskerroin ja maastoluokka

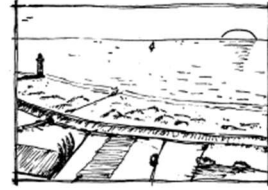
Tuulen voimakkuus vaihtelee rakennetta ympäröivän maaston rosoisuuden mukaan. Maastot jaetaan viiteen eri luokkaan 0-IV kuvan 3 mukaisesti. Rakennuskohteen sijaitessa:

- alle 2 km etäisyydellä, luokan 0 maastosta
- alle 1 km etäisyydellä, luokan I, II tai III maastosta

tulee käyttää sileämmän luokan tuuliparametreja. Näillä muutos alueilla alle 10 prosentin kokoiset rosoisuuden poikkeavuudet voidaan jättää huomioimatta. (6, s. 126.)

Maastoluokka 0

Meri, avoimen meren äärellä oleva rannikkoalue

**Maastoluokka I**

Järvi tai alue, jolla on vähäistä kasvillisuutta eikä esteitä

**Maastoluokka II**

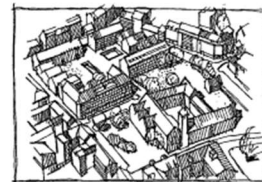
Alue, jolla on matalaa kasvillisuutta, kuten heinää tai ruohoa ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), jotka ovat vähintään esteen 20-kertaisen korkeuden etäisyydellä toisistaan

**Maastoluokka III**

Alue, jolla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä esteitä, jotka ovat esteen 20-kertaista korkeutta lähempänä toisiaan (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)

**Maastoluokka IV**

Alue, jolla vähintään 15 % alasta on rakennusten peitossa ja joiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m



Kuva 3. Maastoluokat (4, s. 158)

3.1.2.2 Rosoisuuskerroin

Rosoisuuskerroin $c_r(z)$ riippuu maaston pinnan rosoisuudesta ja korkeudesta maanpinnan yläpuolella. Rosoisuuskertoimella otetaan huomioon tuulennopeuden modifioitujen perusarvon vaihtelu, rakenteen sijainnista riippuen. (4, s. 34.)

Rosoisuuskerroin korkeudella z saadaan kaavasta 3.

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

kun $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad (4)$$

kun $z \leq z_{\min}$

missä:

z_0 on taulukosta 2 saatava rosoisuusmitta

z_{\min} on taulukossa 2 määritelty minimikorkeus

z_{\max} on mitta, jolle käytetään arvoa 200 m

k_r on maastokerroin, joka riippuu rosoisuusmitasta z_0 . Se lasketaan kaavasta 5.

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (5)$$

missä:

$z_{0,II}$ on 0,05 m (maastoluokka II, taulukko 2).

Kuitenkin määritettäessä rosoisuuskerrointa maastoluokassa 0, käytetään maastokertoimelle k_r arvoa 0,18, kaavasta 5 saatavan arvon sijasta. Merialueiden tuulennopeudet tulevat aliarvioituksi, jos käytetään kaavaa 5. Maastokerroin $k_r = 0,18$ perustuu tilastoaineistoon. (5, s. 2.)

Maastoluokka	z_0 m	z_{\min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10
HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.		

Taulukko 2. Maastoluokat ja –parametrit (4, s.36)

3.1.2.3 Pinnanmuotokerroin

Tuulennopeus muuttuu erilaisten rinteiden, kallioseinämien ja harjanteiden kohdalla tuulensuuntaisesta ja –puoleisesta kaltevuudesta Φ riippuen.

$$\Phi = \frac{H}{L_u} \quad (6)$$

missä:

H on maastokohteen tehollinen korkeus

L_u on tuulenpuoleisen rinteän tuulensuuntainen todellinen pituus.

Jos tuulenpuoleisen maaston kaltevuus on alle 0,05 tai tuulennopeuden kasvu on alle 5 prosenttia, mäkien, jyrkänteiden tms. johdosta, voidaan pinnanmuodostuksen vaikutukset jättää huomioimatta. (4, s. 38; 6, s. 129.)

Pinnanmuodostuksen vaikutukset otetaan huomioon seuraavissa tilanteissa, kuitenkin kuvien 4 ja 5 käyrät ylittävät soveltamisalueen rajat ja näiden ulkopuolella pinnanmuodostuksen vaikutuksen huomioon ottaminen on vapaaehtoista. (4, s. 164.)

Rakennuskohteen sijaitessa molemminpuolisen maastonkohouman tuulenpuoleisessa rinteessä

- kun $0,05 < \Phi \leq 0,3$ ja $|x| \leq L_u / 2$

rakennuskohteen sijaitessa molemminpuolisen maastonkohouman suojanpuoleisessa rinteessä

- kun $\Phi < 0,3$ ja $x < L_d / 2$
- kun $\Phi \geq 0,3$ ja $x < 1,6 H$

rakennuskohteen sijaitessa toispuolisen maastonkohouman tuulenpuoleisessa rinteessä

- kun $0,05 < \Phi \leq 0,3$ ja $|x| \leq L_u / 2$

rakennuskohteen sijaitessa toispuolisen maastonkohouman suojanpuoleisessa rinteessä

- kun $\Phi < 0,3$ ja $x < 1,5 L_e$

- kun $\Phi \geq 0,3$ ja $x < 5 H$.

Pinnanmuotokerroin määritellään seuraavilla kaavoilla, jotka on annettu standardin SFS-EN 1991-1-4 kansallisessa liitteessä. Nämä kaavat poistavat standardin SFS-EN 1991-1-4 liitteessä A.3 annetun menetelmän epäselvyyden, joka syntyi tilanteissa, joissa rinteiden kaltevuus vaihtelee arvon $\Phi = 0,05$ molemmiin puolin.

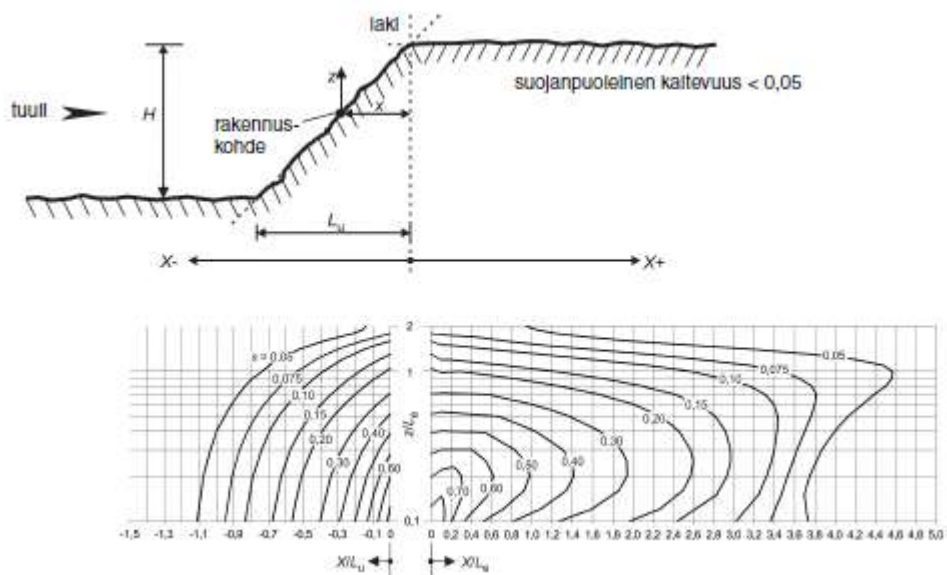
$$c_0 = 1 \quad \text{kun } \Phi \leq 0,05$$

$$c_0 = 1 + 2 s(\Phi - 0,05) \quad \text{kun } 0,05 < \Phi \leq 0,35$$

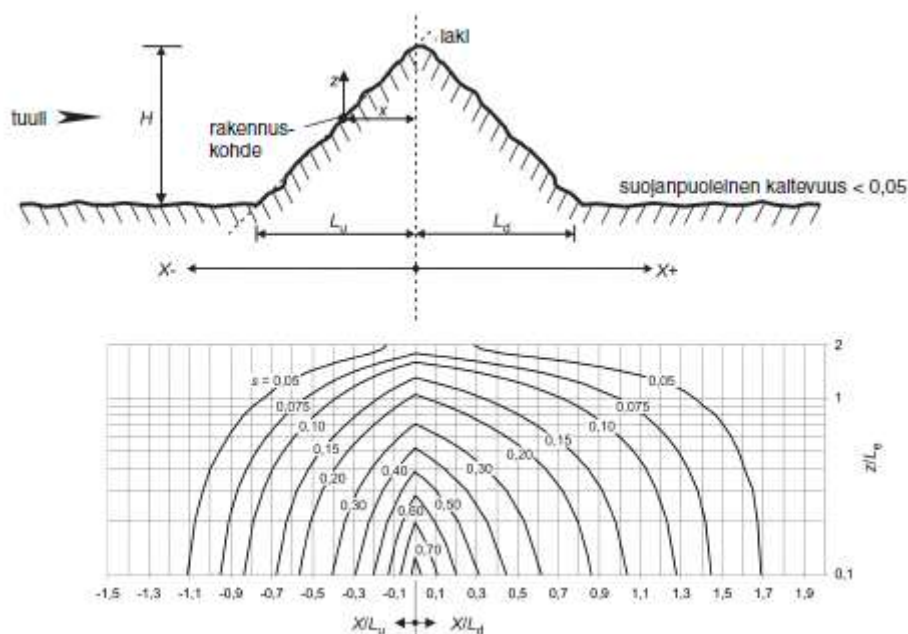
$$c_0 = 1 + 0,6 s \quad \text{kun } \Phi > 0,35$$

missä:

s	on pinnanmuodostukseen liittyvä sijaintikerroin, joka saadaan kuvasta 4 tai kuvasta 5
L_e	on taulukossa 3 määritelty tuulenpuoleisen rinteiden teollinen pituus
L_d	on suojanpuoleisen rinteiden tuulensuuntainen todellinen pituus
x	on rakennuskohteen vaakaetäisyys laen kohdalta.
z	on pystyettäisyys rakennuskohteen maanpinnan korkeudelta.



Kuva 4. Toispuolisten maastonkohoumien sijaintikerroin s (4, s. 166)



Kuva 5. Moleminpuolisten maastonkohoumien sijaintikerroin s (4, s. 168)

Rinteen tyyppi ($\Phi = H/L_u$)	
Loiva ($0,05 < \Phi < 0,3$)	Jyrkkä ($\Phi > 0,3$)
$L_e = L_u$	$L_e = H/0,3$

Taulukko 3. Tehollisen pituuden arvot (4, s. 166)

3.1.3 Tuulenpuuskien intensiteetti

Tuulenpuuskien intensiteetti lasketaan kaavalla 7.

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) \ln(z/z_0)} \quad (7)$$

kun $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad (8)$$

kun $z \leq z_{\min}$

missä:

k_l on pyörteisyyskerroin, jonka suositusarvo on 1,0

c_0 on kohdassa 3.1.2.3 esitetty pinnanmuotokerroin

z_0 on taulukossa 2 esitetty rosoisuusmitta.

σ_v on kaavan 9 mukainen turbulenssin keskihajonta

$$\sigma_v = k_r v_b k_l \quad (9)$$

missä:

k_r on kohdassa 3.1.2.2 esitetty maastokerroin

v_b on kohdassa 3.1.1 esitetty tuulennopeuden perusarvo

k_l on pyörteisyyskerroin, jonka suositusarvo on 1,0.

3.1.4 Puuskanopeuspaine

Puuskanopeuspaine lasketaan kaavalla 10.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (10)$$

missä:

$q_p(z)$	on puuskanopeuspaine korkeudella z
$I_v(z)$	on kohdan 3.1.3 tuulenpuuskien intensiteetti
ρ	on ilman tiheys, joka riippuu maantieteellisestä korkeusasemasta, lämpötilasta ja ilmanpaineesta, joka alueella on odotettavissa myrskyjen aikana. Suositusarvo on 1,25 kg/m ³
v_m	on kohdan 3.1.2 tuulennopeuden modifioitu perusarvo.

3.1.5 Tuulen ominaiskuorma

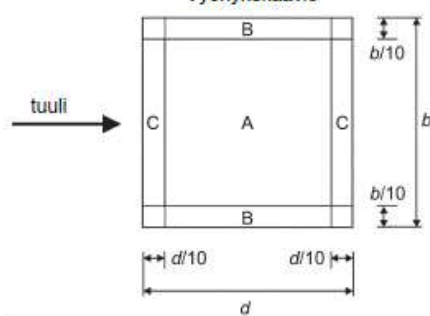
Tuulikuorma voidaan laskea joko kokonaisvoimakertoimen avulla tai nettopainekertoimien avulla. Kokonaisvoimakerroin edustaa kuormaresultanttia ja suorien katoksien kuormitusyhdistelmiin on tälle määritetty sijainnit kuvassa 7, s. 18. Nettopainekerroin edustaa suurinta paikallista painetta eri tuulensuuntien vallitessa ja tätä käytetään katteen osia ja kiinnityksiä mitoittaessa. (4, s. 92.)

Rakenteen kokonaistuulikuorma $F_{w,k}$ voimakertoimen avulla saadaan käyttämällä kaavaa 11.

$$F_{w,k} = c_s c_d c_f q_p(z_e) A_{ref} \quad (11)$$

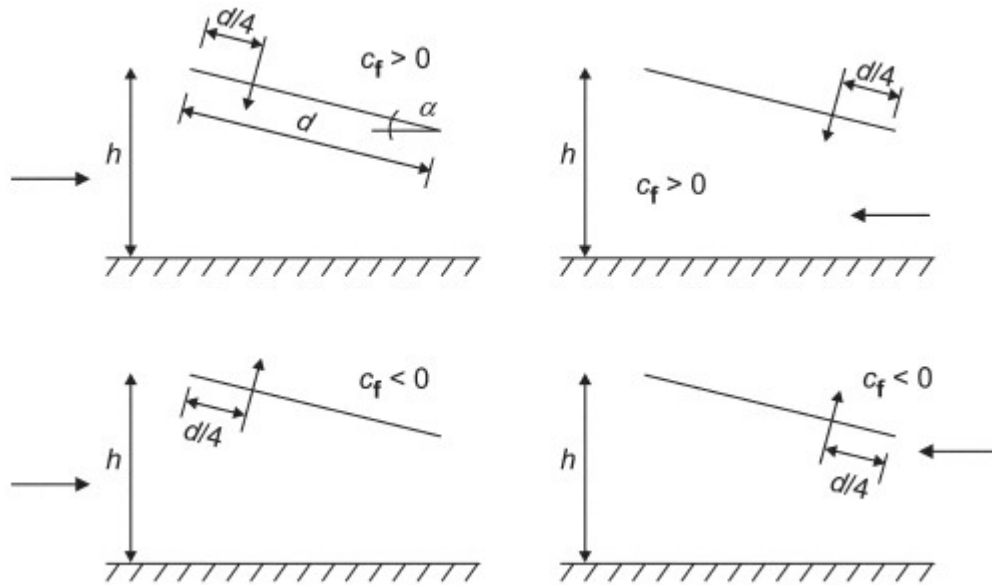
missä:

$c_s c_d$	on kohdan 3.1.6 mukainen rakennekerroin
c_f	on kuvan 6 mukainen voimakerroin, joka sisältää kitkan vaikutuksen
$q_p(z_e)$	on puuskanopeuspaine nopeuspainekorkeudella z_e
z_e	on kuvan 7 mukainen nopeuspainekorkeus
A_{ref}	rakenteen tuulenpaineen vaikutusala.

			Nettopaineen kertoimet $c_{p,net}$		
			<p>Vyöhykekaavio</p> 		
Kaltevuuskulma α	Umpinaisuussuhde ϕ	Kokonaisvoimakertoimen c_f	Vyöhyke A	Vyöhyke B	Vyöhyke C
0°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 0,2 - 0,5 - 1,3	+ 0,5 - 0,6 - 1,5	+ 1,8 - 1,3 - 1,8	+ 1,1 - 1,4 - 2,2
5°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 0,4 - 0,7 - 1,4	+ 0,8 - 1,1 - 1,6	+ 2,1 - 1,7 - 2,2	+ 1,3 - 1,8 - 2,5
10°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 0,5 - 0,9 - 1,4	+ 1,2 - 1,5 $ AC > 1,6 < AC $	+ 2,4 - 2,0 - 2,6	+ 1,6 - 2,1 - 2,7
15°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 0,7 - 1,1 - 1,4	+ 1,4 - 1,8 - 1,6	+ 2,7 - 2,4 - 2,9	+ 1,8 - 2,5 - 3,0
20°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 0,8 - 1,3 - 1,4	+ 1,7 - 2,2 - 1,6	+ 2,9 - 2,8 - 2,9	+ 2,1 - 2,9 - 3,0
25°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 1,0 - 1,6 - 1,4	+ 2,0 - 2,6 - 1,5	+ 3,1 - 3,2 - 2,5	+ 2,3 - 3,2 - 2,8
30°	Maksimi $\forall \phi$ Minimi $\phi = 0$ Minimi $\phi = 1$	+ 1,2 - 1,8 - 1,4	+ 2,2 - 3,0 - 1,5	+ 3,2 - 3,8 - 2,2	+ 2,4 - 3,6 - 2,7
<p>HUOM. Merkintä $\forall \phi$ tarkoittaa kaikkia suhteen ϕ arvoja. Etumerkki + ilmaisee, että nettotuulikuorma vaikuttaa alaspäin. Etumerkki - ilmaisee, että nettotuulikuorma vaikuttaa ylöspäin.</p>					

Kuva 6. Nettopaineen kertoimien ja voimakertoimien arvot suoralle katokselle (4, s. 96)

Kuvan 6 kertoimiin on otettu huomioon sekä katoksen ylä- että alapinnalle vaikuttavan tuulen yhteisvaikutus kaikilla tuulen suunnilla.



Kuva 7. Nopeuspaine korkeus ($z_e = h$) ja kuormaresultantin paikka suoralle katoxelle (4, s. 98)

Rakenteeseen vaikuttava kokonaistuulikuorma nettopaine kertoimien avulla saadaan kaavalla 12.

$$F_{w,k} = F_{w,e} + F_{fr} \quad (12)$$

Rakenteeseen vaikuttava tuulikuorma $F_{w,e}$ saadaan kaavalla 13.

$$F_{w,e} = c_s c_d \sum_{pinnat} w_e A_{ref} \quad (13)$$

missä:

$c_s c_d$	on kohdan 3.1.6 mukainen rakennekerroin
w_e	on kaavan 14 mukainen, yksittäiseen pintaan korkeudella z_e vaikuttava ulkopuolinen paine
A_{ref}	on yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala

Yksittäiseen pintaan kohtisuoraan vaikuttava paine w_e saadaan kaavalla 14.

$$w_e = q_p(z_e) c_{p,net} \quad (14)$$

missä:

$q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine korkeudella z_e

z_e on kuvan 7 mukainen nopeuspainekorkeus

$c_{p,net}$ on kuvan 6 mukainen nettopaine kerroin.

Katoksen tuulikuormaa määritettäessä painekertoimien avulla, tulee kitka ottaa huomioon. Kitka vaikuttaa pinnan suuntaisesti ja se lasketaan kaavalla 15.

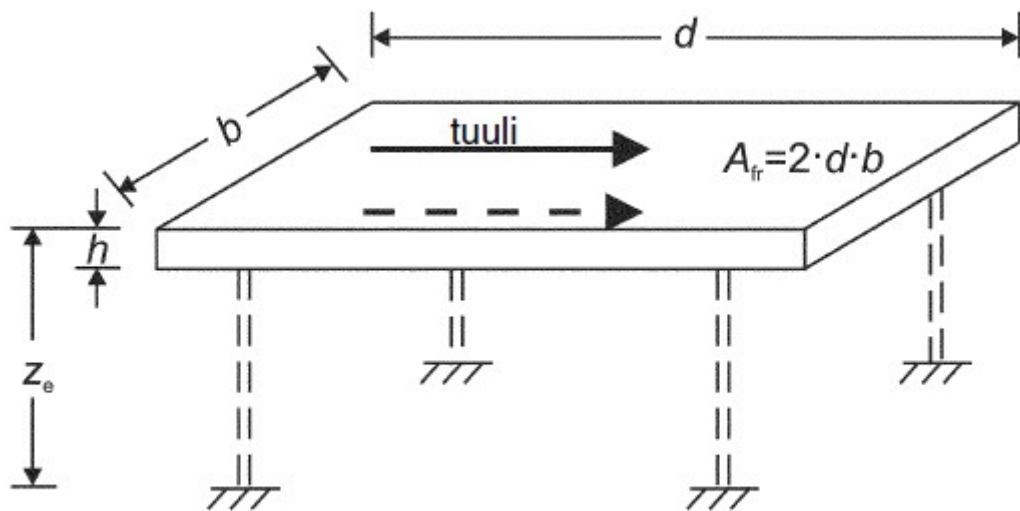
$$F_{fr} = c_{fr} q_p(z_e) A_{fr} \quad (15)$$

missä:

$q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine korkeudella z_e

A_{fr} on kuvan 8 mukainen kitkakuorman vaikutusala

c_{fr} on taulukon 4 mukainen kitkakerroin.



Kuva 8. Kitkakuorman vaikutusala (4, s. 112)

Pinta	Kitkakerroin c_{fr}
Sileä (eli teräs, sileä betoni)	0,01
Karhea (eli karhea betoni, bitumihuopa)	0,02
hyvin karhea (eli aalto-, ripa- tai poimuprofilointi)	0,04

Taulukko 4. Kitkakertoimet (4, s. 110)

3.1.6 Rakennekerroin

Rakennekerroin ottaa huomioon tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuuden pinnalla c_s ja turbulenssista aiheutuvan rakenteen värähtelyn c_d .

Seuraaville tapauksille voidaan käyttää kertoimelle $c_s c_d$:lle arvoa 1:

Rakennuksille, joiden korkeus on alle 15 metriä.

Ulkoseinän ja vesikaton rakenneosille, joiden ominaistajuus on yli 5 Hz.

Rakennuksille, joiden rungossa on kantavat seinät ja joiden korkeus on alle 100 m ja samalla pienempi kuin 4 kertaa rakennuksen tuulensuuntainen mitta.

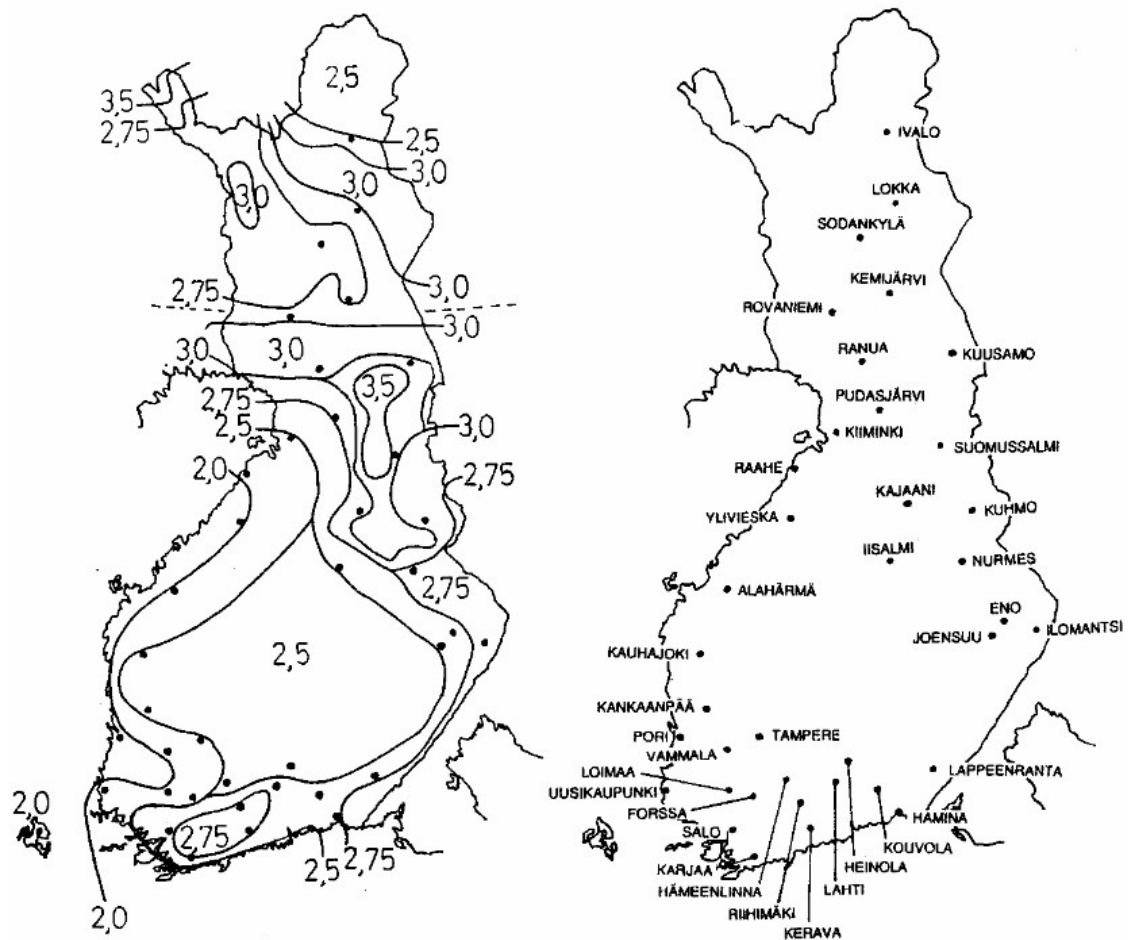
Savupiipuille, joiden poikkileikkaus on pyöreä ja joiden korkeus on alle 60 m ja 6,5 kertaa halkaisija.

Maatelineillä on harvinaista, että edellä mainituista ehdoista korkeus vaatimus ei toteutuisi, maatelineiden ollessa yleensä mahdollisimman matalia. Suunnittelija voi halutessaan tarkastaa värähtelyn, vaikka rakennekerroin jäisikin ykköseksi, eurokoodi 1991-1-4 esittää yksityiskohtaisen menettelytavan kertoimien c_s ja c_d määrittämiseen. (4, s. 48.)

3.2 Lumikuorma

Lumikuorman suuruuteen vaikuttavat maantieteellinen sijainti, maaston tuulisuus, viereisten rakennusten läheisyys, rakenteen muoto ja kaltevuus. (6, s. 94.)

Rakenteen lumikuorman määrittämiseksi tarvitaan maassa olevan lumikuorman ominaisarvo s_k , jonka minimiarvo saadaan kuvasta 9.



Kuva 9. Lumen ominaisarvot maan pinnalla (7, s. 15)

Telineelle tulevan lumikuorman ominaisarvo saadaan kaavalla 16.

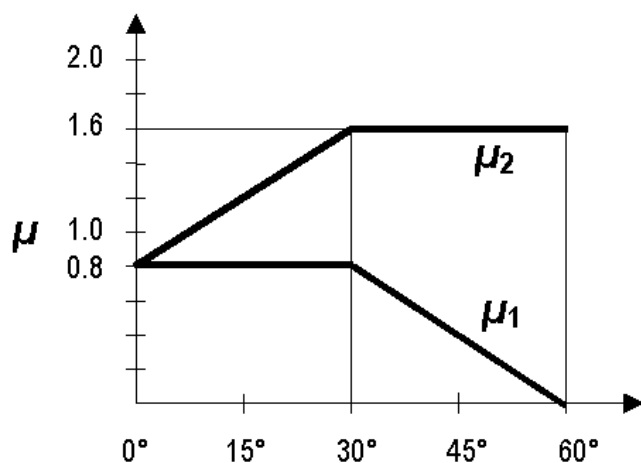
$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (16)$$

missä	μ_i	Lumikuorman muotokerroin
	s_k	maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [kN/m ²], kuvasta 10
	C_e	tuulensuojaisuuskerroin (1,0 tai 0,8)
	C_t	lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti on 1,0

C_e :n arvoa 0,8 voidaan käyttää tuulisessa maastossa. Muulloin $C_e=1,0$. Tapauskohtaisesti voidaan lumikuorman ominaisarvoksi kuitenkin sopia suurempi arvo

ja rakenteen lumikuorman ominaisarvona s tulee kuitenkin käyttää vähintään arvoa $0,5 \text{ kN/m}^2$. (6, s. 94.)

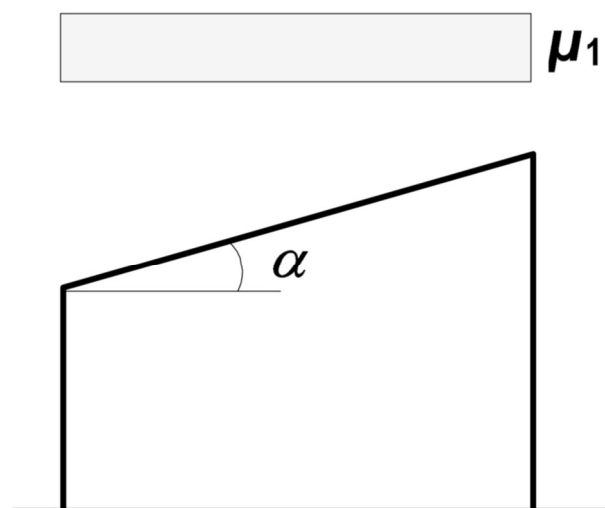
Lumikuorman muotokerroin telineelle saadaan, joko kuvasta 10 tai taulukosta 5.



Kuva 10. Lumikuorman muotokertoimet (8, s. 30)

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	—

Taulukko 5. Lumikuorman muotokertoimet (8, s. 30)



Kuva 11. Pulpettikaton muotokerroin (8, s. 32)

4 Kuormitusyhdistelmät ja rajatilat

4.1 Kuormitusyhdistelmät

Kuormat luokitellaan aikariippuvuuden perusteella pysyviin kuormiin (G), muuttuviin kuormiin (Q) ja onnettomuuskuormiin (A).

Pysyvillä kuormilla tarkoitetaan mm. rakenteen omaa painoa ja epätasaisten painumien aiheuttamia välillisiä kuormia, muuttuvilla kuormilla tarkoitetaan mm. hyöty-, tuuli- ja lumikuormia ja onnettomuuskuormilla tarkoitetaan mm. ajoneuvojen törmäyksestä aiheutuvia kuormia.

Kuormitusyhdistelyssä yhdistetään kuormat, jotka voivat esiintyä samanaikaisesti. Taulukossa 6 on esitetty kuormitusyhdistelyssä käytettävät yhdistelykertoimet ψ_i , joilla otetaan huomioon epätodennäköisyys kaikkien suurimpien kuormien esiintymiseen samanaikaisesti. Laskelmissa valitaan pääasiallinen kuorma ja muita kuormia voidaan pienentää, rajatilasta riippuen, yhdistelykertoimilla.

Pääasiallista kuormaa vaihtamalla ja yhdistelykertoimien, mahdollisten kuormakertoimien ja osavarmuuskertoimien avulla saadaan selville rakenteen tai rakenneosan epäedullisin kuormitustapaus, joka rakenteen tai rakenneosan tulee kestää.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun $s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{**)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**)} Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

Taulukko 6. Kertoimien ψ arvot rakennuksille (9, s. 18)

4.2 Murtorajatila

Murtorajatiloiksi luokitellaan kaikki ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen liittyvät rajatilat. Murtorajatilassa tarkistetaan mm. jäykän kappaleen tai sen jonkin osan tasapainon menetys, liian suuresta siirtymätilasta aiheutunut vaurioituminen, rakenteen muuttuminen mekanismiksi, katkeaminen ja stabiiliuden menetykset. (10, s.52–54.)

Rakenneosien kestävyyttä murtorajatilassa osoittaessa käytetään kaavojen 17–18 mukaisia lausekkeitä. Lausekkeista käytetään epäedullisempaa tilanteesta riippuen. Rakenteen staattisen tasapainon, onnettomuuksien tai rakenneosien kestävyysmäärittämiseen geoteknisten kuormien vaikuttaessa lausekkeet kuormien mitoitusarvoille saadaan eurokoodin SFS-EN 1990+A1 liitteestä A1.

Seuraamusluokat CC ovat selitetty taulukossa 7 ja näitä vastaavat luotettavuusluokat RC ja kuormakertoimet K_{FI} saadaan taulukosta 8. Yhdistelykertoimien arvot on esitetty taulukossa 6.

$$\left. \begin{matrix} 1,15 \\ 0,9 \end{matrix} K_{FI} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (17)$$

kuitenkin vähintään

$$\left. \begin{matrix} 1,35 \\ 0,9 \end{matrix} K_{FI} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \quad (18)$$

missä	$Q_{k,1}$	pääasiallisen muuttuvan kuorman ominaisarvo
	$Q_{k,i}$	muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot
	$\psi_{0,i}$	yhdistelykerroin
	K_{FI}	kuormakerroin
	$G_{k,j}$	pysyvien kuormien ominaisarvot
	γ_P	esijännitysvoiman osavarmuuskerroin
	P	esijännitysvoima

Pysyvän kuorman ollessa edullista käytetään kerrointa 0,9 ja kuorman ollessa epäedullista käytetään kerrointa 1,15 K_{FI} tai 1,35 K_{FI} .

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo)
CC2	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus)
CC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset), kasvihuoneet

Taulukko 7. Seuraamusluokkien määrittely (10, liite B)

Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	K_{FI}
-----------------	--------------------	----------

CC3	RC3	1,1
CC2	RC2	1,0
CC1	RC1	0,9

Taulukko 8. Kuormakertoimet seuraamus- ja luotettavuusluokille

Maatelineen määräävimiksi osoittautuneet kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa:

$$\text{KY 1: } 1,15 K_{FI} G_{k,omapaino} + 1,5 K_{FI} Q_{k,tuulikuorma} + 1,5 K_{FI} \Psi_{0,lumi} Q_{k,lumikuorma}$$

$$\text{KY 2: } 1,15 K_{FI} G_{k,omapaino} + 1,5 K_{FI} Q_{k,lumikuorma} + 1,5 K_{FI} \Psi_{0,tuuli} Q_{k,tuulikuorma}$$

$$\text{KY 3: } 0,9 G_{k,omapaino} + 1,5 K_{FI} Q_{k,tuulikuorma}$$

Suurimmat sauvavoimat ja kiinnityskiskon rasitukset tuleva kahdella ensimmäisellä yhdistelmällä. Kolmannella yhdistelmällä sauvojen rasitukset jäävät pienemmäksi kuin kahdella ensimmäisellä, vaikkakin osa puristussauvoista muuttuikin vetosauvoiksi ja toisin päin. Kolmannella yhdistelmällä saadaan kuitenkin selville vaatimuksia perustuksille, esimerkiksi vaaditun betoniperustuksen painon tai ruuvipaalun vetokestävyyden muodossa, tarkasteltaessa telineen tasapainon menestystä jäykkänä kappaleena, jossa tuuli vaikuttaa telinettä nostavana ja kaatavana voimana.

Nämä yhdistelmät lasketaan katteelle ja jäykistävälle rungolle erikseen. Katteelle ja sen osille tulee, tuulikuorman ominaisarvoa määrittäessä, käyttää nettopaineenkerrointa $c_{p,net}$ ja jäykistävälle rungolle kokonaisvoimakerrointa c_f . (4, s. 92.)

Olennaisena osana on suorien katoksien rungolle annetut omat kokonaisvoiman murtorajatilan kuormitusyhdistelmät ja kokonaisvoiman resultantin vaikutuspiste, jotka on esitetty kuvassa 7. Rungon rasituksia määrittäessä nämä lisäkuormitusyhdistelmät kaksinkertaistivat kuormitusyhdistelmät, koska rasitukset tulee tarkastaa jokaisella kokonaistuulivoiman resultantin paikalla. (4, s. 94.)

4.3 Käyttörajatila

Käyttörajatilaksi luokitellaan rajatilat, jotka liittyvät rakenteen tai rakenneosien toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön. (10, s.54.)

Käyttörajatilassa tarkastetaan mm. siirtymät, jotka vaikuttavat ulkonäköön tai rakenteen toimivuuteen, värähtelyt, jotka vaikuttavat rajoittavat rakenteen käyttökelpoisuutta käyttötarkoitukseensa ja vauriot, jotka todennäköisesti vaikuttavat kielteisesti rakenteen ulkonäköön. (10, s.54.)

Käyttörajatilien mitoitusarvot on annettu kaavoissa 19–21.

Ominaisyhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (19)$$

Tavallinen yhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (20)$$

Pitkäaikaisyhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (21)$$

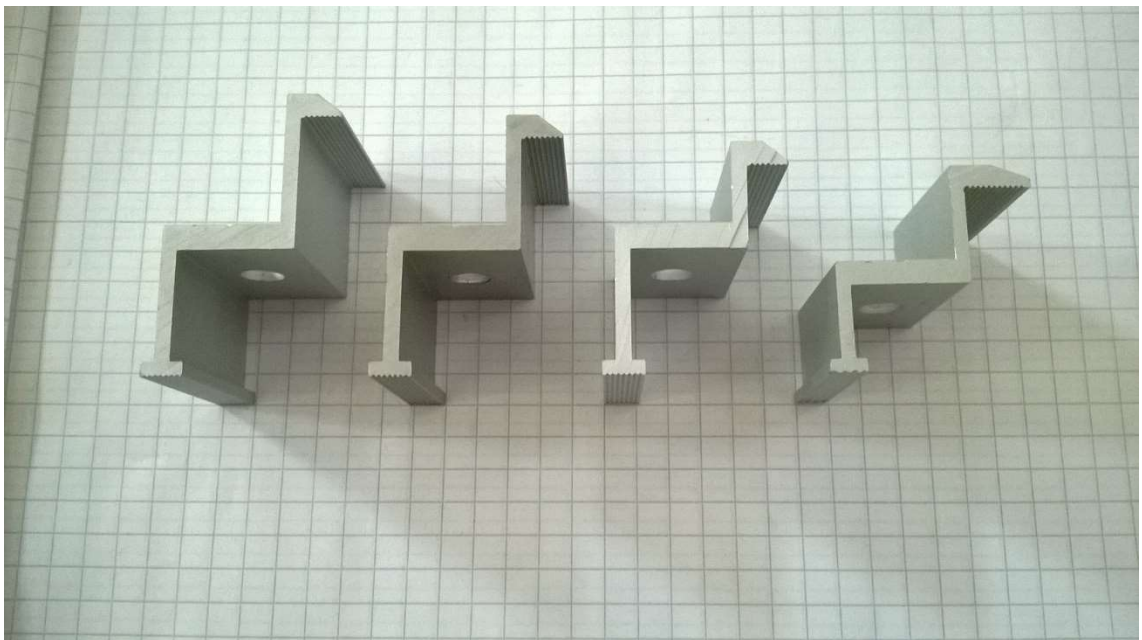
missä	$Q_{k,1}$	pääasiallisen muuttuvan kuorman ominaisarvo
	$Q_{k,i}$	muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot
	$\psi_{i,i}$	yhdistelykertoimet
	$G_{k,j}$	pysyvien kuormien ominaisarvot
	γ_P	esijännitysvoiman osavarmuuskerroin
	P	esijännitysvoima

Ominaisyhdistelmää käytetään palautumattomille rajatiloille eli tutkittaessa esimerkiksi poikkileikkauksen halkeamista ja muurattujen seinien halkeilua, tavallista yhdistelmää käytetään tarkasteltaessa palautuvia rajatiloja, kuten taipumia ja siirtymiä ja pitkäaikaisyhdistelmää käytetään, kun tarkastellaan esimerkiksi rakennuksen ulkonäköä.

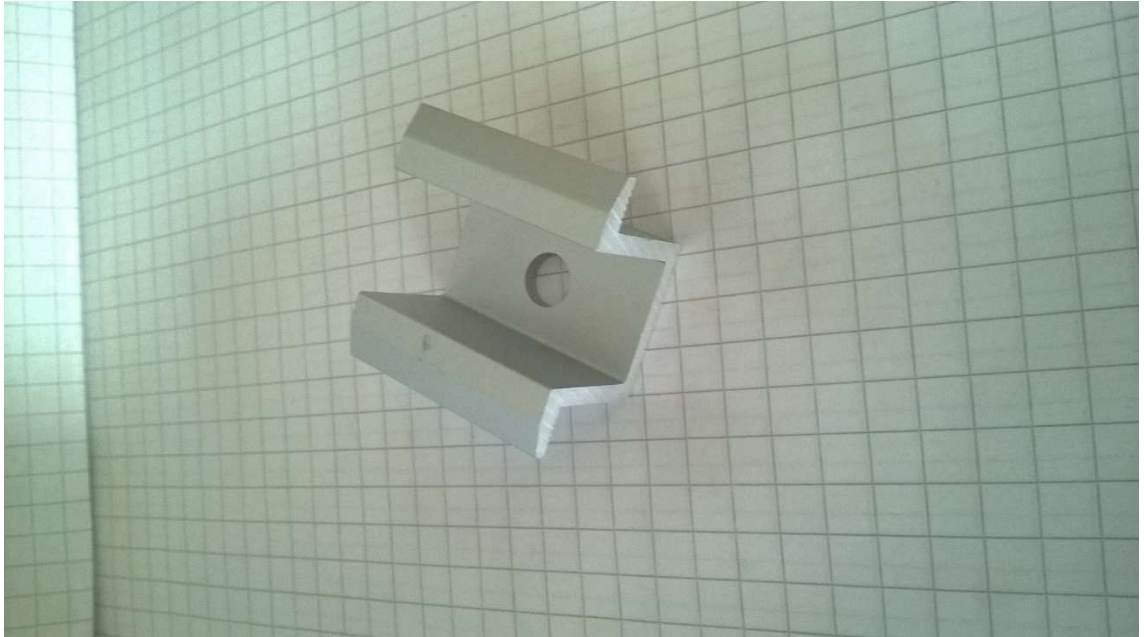
5 Rakenteen valinta

Telineeseen tulee yhteensä 20 paneelia, kahteen riviin asennettuna ja paneelit asetetaan pystyasentoon, liitteen 6 mukaisesti. Aurinkopaneelien ulkomitat vaihtelevat paljon ja työhön aurinkopaneelin kooksi rajattiin 1650 mm x 991 mm. Rakenteen osat mitoitettiin Eurokoodi 3:n ohjeiden mukaan.

20 paneelin järjestelmä on sopiva sähköteknisesti ja kiskojen alle tuleva tukirakenne saatiin asetettua päätyihin ja joka toisen paneelin kiinnityspisteen kohdalle. Aurinkopaneelit kiinnitetään molemmalta pitkältä sivulta neljännespisteestä kiinnityskiskoon yleisesti käyttäen kuvan 12 ja 13 tyyllisiä kiinnityskappaleita.



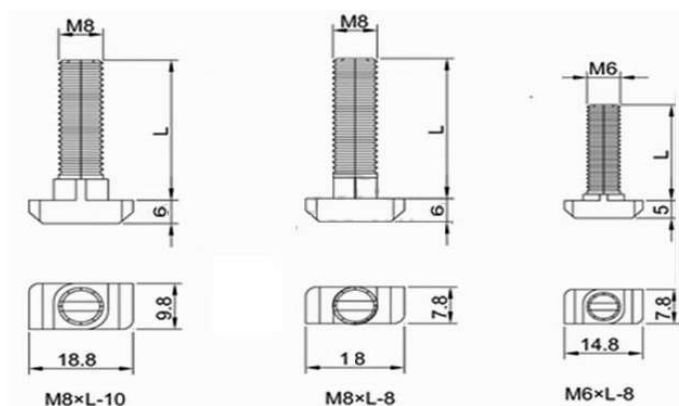
Kuva 12. Paneelin kiinnikepala reunassa (1)



Kuva 13. Paneelien kiinnikepala paneelien välissä (1)

Kiinnityskiskot sijoitetaan neljäsosapisteeseen aurinkopaneelin pitkää sivua, jolloin aurinkopaneelin taivutus on tasaisempi. Aurinkopaneelien tuuli- ja lumikuormat siirretään kiinnityskiskojen välityksellä kantavalle rungolle.

Paneelit kiinnitetään kiskoon useasti käyttäen kuvan 14 tyylistä T-pulttia, joka mahdollistaa usean erilaisen kiskon poikkileikkauksen käytön, kun liittäminen vaatii vain pidennetyn reiän tai monissa maatelineissä käytettyjen kiskojen kaltaisia poikkileikkauksia, jossa T-pultin kanta sopii poikkileikkauksen hahloon ja mutteria kiristettäessä pultti puristuu reiän tai kiskon reunaa vasten muotonsa ansiosta.



Kuva 14. T-pultti (11)

5.1 Rakenteen tyyppi

Ristikkorakenteen kustannukset muodostuvat muun muassa materiaalimene-
kistä, konepajavalmistuksesta, työmaa-asennuksesta, pintakäsittelystä ja suun-
nittelukustannuksista. Vähemmällä ja raskaammilla sauvoilla toteutettu ristikkora-
kenne saattaa olla kustannuksiltaan edullisempi kuin kevyempi sauvainen ris-
tikko, jossa on enemmän sauvoja. Rakenteen edullisin tyyppi on ratkaistava ta-
pauskohtaisesti. (12, s. 420.)

Tässä työssä edullisempaa rakennetta haettiin vertailemalla kahden erilaisen
staattisesti määrätyn rakenteen rasituksia, vaadittuja sauvakokoja ja liitoksien lu-
kumäärää.

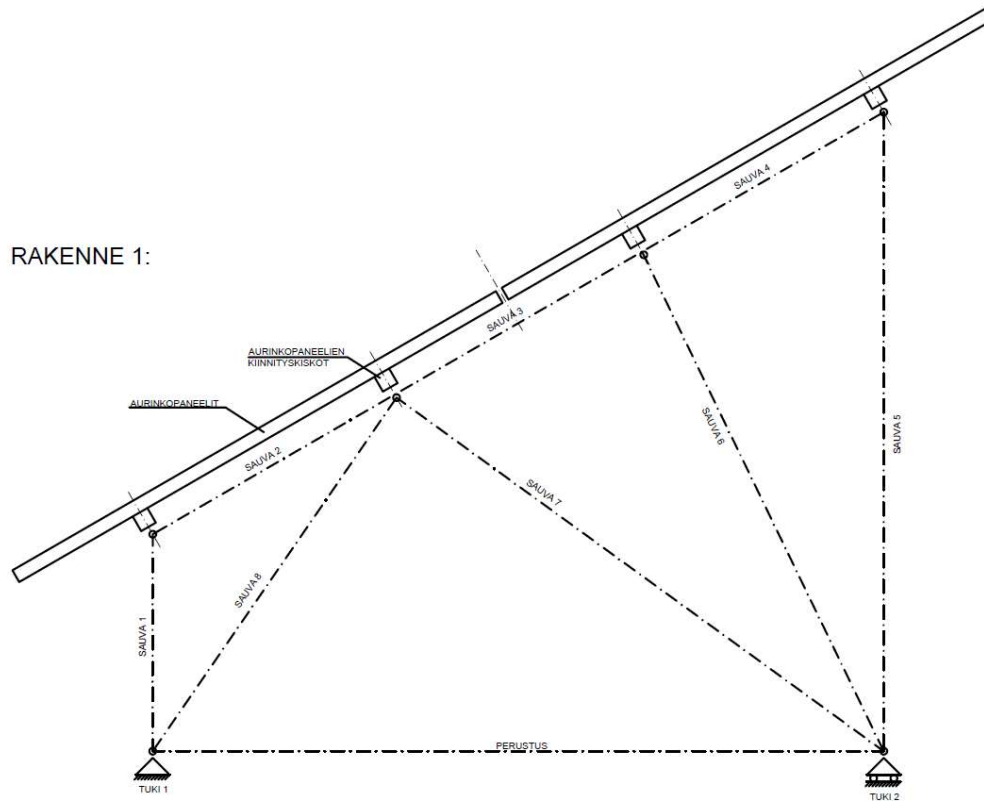
Rakenteen mallia suunniteltaessa mietittiin yhden jäykän tuen rakennetta ja kah-
den niveltuen rakennetta. Yhtenä lähtökohtana rakenteelle oli, että se voitaisiin
perustaa myös ruuvipaalun varaan ja tämä rajasi pois jäykän tuen rakenteen.

Kuvissa 15 ja 16 esitetyissä rakennemalleissa sauva 2–4 on yhtä sauvaa. Sauva
on jaettu osiin, koska rasitukset eivät ole tässä sauvassa tasaisesti koko matkalla.
Kuvissa näkyvä, ”perustus” -tekstillä varustettu sauva, on joko terässauva tai be-
toninen perustus, riippuen siitä käytetäänkö telineen perustamiseen betonia vai
ruuvipaalua. Molemmat rakennemallit tutkittiin mallintamalla molemmat tuet sivu-
siirtymättöminä tukina ja toinen tuki sivusiirtyvänä.

Ensimmäisessä, kuva 15, rakenteessa tavoiteltiin ideaaliristikkoa. Ideaaliristikolla
tarkoitetaan ristikkoa, joka koostuu kolmioiden muotoon liitetyistä nivelpäisistä
sauvoista, jossa kaikki kuormat siirretään sauvojen solmukohtien kautta perus-
tuksille, jolloin sauvoihin syntyy vain aksiaalinen voima, joko puristavan tai vetä-
vänä. Ideaaliristikkoa kuormitetaan myös vain solmu- tai nurkkapisteistä. (13, s.
76.)

Ensimmäisessä rakenteessa etuna on rakenteen pienemmät sauvavoimat, leik-
kaus- ja taivutusvoimien puuttuminen ja mitoituksen yksinkertaisuus, kun sauvat
ovat vain aksiaalisesti kuormitettuja. Rakenteeseen tulee kuitenkin enemmän lii-
toksia ja sauvoja, jolloin edullisemmaksi voi tulla toisen rakenteen käyttö, jossa

sallitaan taivutuksen syntyminen parresauvaan ja yksittäisten sauvojen aksiaalinen kuormitus kasvaa. Toisen rakenteen etuna on vähemmät sauvat ja liitokset. Toisessa rakenteessa tulee kuitenkin tarkistaa leikkaus- ja taivutusvoimien aiheuttamat vaikutukset, jolloin myös suunnittelusta tulee työläämpää.



Kuva 15. Rakennevaihtoehto 1

Toisessa, kuvan 16, rakenteessa sallitaan taivutusmomentin ja leikkausvoiman syntyminen parresauvaan poistamalla sauvoja. Poistamalla sauvoja rakenteeseen tulee luonnollisesti vähemmän liitoksia, mutta yksittäisen sauvan rasitusten kasvaessa voidaan vaatia vahvempia sauvoja. Kuvassa 17 on esitetty rakenteiden sauvojen suurimmat puristusvoimat.

sauvalle voidaan valita korkeampi poikkileikkaus kasvattamatta ulkomittaa toiseen suuntaan. On luonnollista käyttää samaa poikkileikkausta kaikissa sauvoissa, eikä myöskään, konepajavalmistuksen helpottamiseksi, kannata käyttää 2–4 useampaa sauvakokoa. (12, s. 423.)

Ristikkorakenteissa liitokset muodostavat suuren osuuden kustannuksista, joten vähentämällä liitoksia saadaan kustannussäästöjä. Rakenne 2:ssa on liitoksille enemmän tilaa, koska yksi sauva puuttuu.

5.2 Materiaali ja lujuusluokka

Rakenteen materiaaliksi mietittiin joko alumiinia tai terästä. Teräksen käytössä on etuna suurempi myötölujuus ja kimmokerroin, jolloin sauvoista voidaan saada pienempiä ja usean sauvan liitoksille jää enemmän tilaa. Alumiinin kimmokerroin on vain kolmasosa teräksestä ja teräkselle on valittavissa huomattavasti suurempia lujuusluokkia. Alumiinilla on kuitenkin hyvä korroosionkesto, kun taas teräksen korroosionkesto täytyy toteuttaa sinkityksellä tai maalauksella.

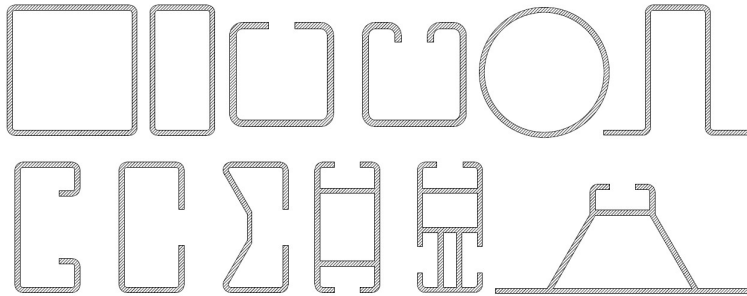
Teräksen lujuuden muutos ei muuta kimmokertoimen arvoa, jolloin ei lujuuden muutoksella saada etua esimerkiksi taipumaan, vaan poikkileikkauksen muodon valinta on tärkeämpää. Rakenteissa, joissa oma paino on merkittävä osa kokonaiskuormitusta, tai rakenteella, jonka painolla on muuten merkitystä, voidaan lujuusluokan nostamisella saavuttaa huomattavia etuja. (14, s. 21.)

Valitsemalla korkeamman lujuuden teräs voidaan saada etua hitsaus- ja työkuksannuksiin, mutta suurempi lujuusluokka voidaan hyödyntää täysin vain vedetyillä rakenteissa. Taivutetuissa ja nurjahtavissa rakenteissa ei suuremman lujuusluokan teräksestä ole aina merkittävää hyötyä, sillä rakenteen mittojen pieneneminen saattaa heikentää kestävyyttä. (13, s. 29.)

5.3 Poikkileikkaukset

Kuvassa 18 on esitetty joitakin ristikoissa ja maatalineissa käytettyjä sauvojen ja palkkien poikkileikkauksia. Maatalineissa käytetään useasti kuvassa alaoikealla olevien poikkileikkausten tyyliä alumiinisia palkkeja. Pilareina ja palkkeina käytetään useasti myös I- ja H-poikkileikkauksia, näistä ei kuitenkaan tahdo löytyä

tarpeeksi pieniä kokoja maatalineen rasiusten suuruusluokkaan. Ristikot tehdään pääasiassa rakenneputkista, joissa neliö- ja suorakaidepoikkileikkaukset ovat valmistustekniikan kannalta pyöreitä putkia edullisempia, koska pyöreiden putkien uumasauvojen vaikeat muotoleikkaukset ja liitoksien valmistukset ovat hankalaa. (13, s. 78.)



Kuva 18. Maatelineissä käytettyjä poikkileikkauksia

Erilaisten avoprofiilien käytöstä on etua muun muassa liitosten suunnittelun vaiheessa. Avoprofiileilla on mahdollista toteuttaa liitoksia, joissa sauvat saadaan liitettyä toisiinsa helposti ruuviliitoksilla, ilman hitsejä. Putkiprofiileilla tämä on hieman ongelmallisempi, koska mutteria tai ruuvia ei pystytä kiristämään putken sisällä ja liitos vaatii hitsejä tai ruuvi on vietävä koko putken läpi. Avoprofiilien käytöstä on myös etua sinkityksen kustannuksissa, koska näillä profiileilla on vähemmän korroosiolle altista pinta-alaa, jolloin sinkkiä ei tarvita yhtä paljon kuin putkiprofiileilla, joiden putken sisäpuolikin on hyvä sinkkiä. Umpirofiileilla myös tulee huomioda, ettei putken päitä suljeta kokonaan, vaan putkeen on tehtävä tarvittaessa sinkin valutusreiät.

Tavanomaisissa ristikoissa ja pilareissa on hyötyä käyttää putkiprofiileja ja muita kotelomaisia profiileja, joilla on suuremmat vääntö- ja taivutuskestävyydet kaikissa suunnissa. Maatelineen asennuspaikan sijaitessa alueella, jossa lumi- ja tuulikuormat ovat vähäisempiä, on rakenteen kustannuksia helppo karsia pienentämällä materiaali-paksuutta. Putki- ja koteloprofiileilla tämä käy helposti poikkileikkauksen ulkomittoja tai rakenteen geometriaa muuttamatta. (13, s. 23.)

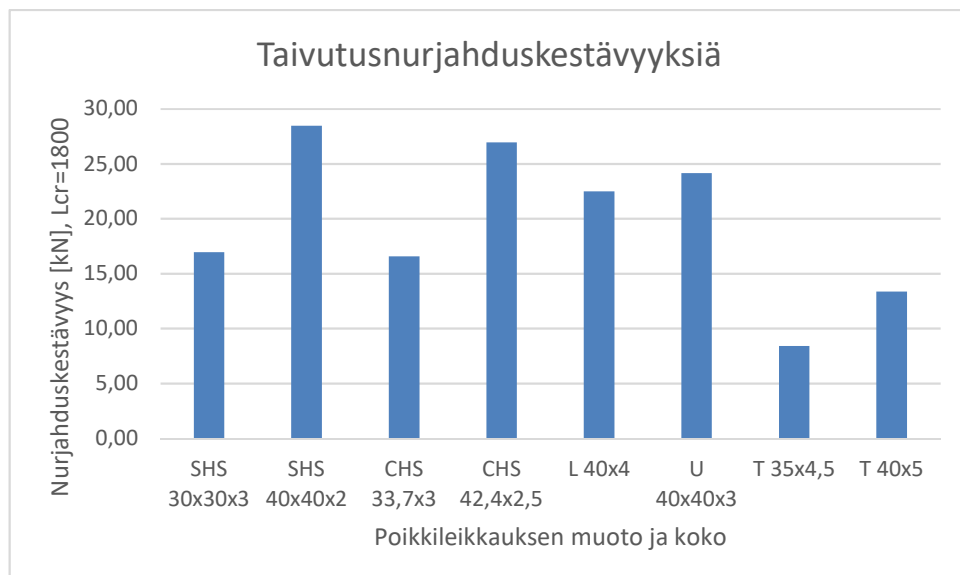
Valitsemalla rakenteeseen tavanomaisia poikkileikkauksia, kuten esimerkiksi RHS-, SHS- ja CHS-putkiprofiilit, osien saatavuus helpottuu, eikä tarvitse toimia

vain muutaman toimittajan mahdollisuuksien mukaan. Paljon käytetyille poikkileikkauksille löytyy myös paljon suunnitteluohjeita, jotka nopeuttavat suunnittelua ja näin pienentävät suunnittelukustannuksia.

5.3.1 Aksiaalisesti kuormitetut sauvat

Molemmissa vertailuissa rakenteissa suurin osa sauvoista toimii joko puristettuna tai vedettynä sauvana, kuormitusyhdistelmästä riippuen. Keskeisesti kuormitetun sauvan kestävyyttä pienentäviä epästabiiliuden muotoja ovat taivutusnurjahdus, vääntönurjahdus ja taivutusvääntönurjahdus. Näistä toteutuu se, joka vaatii vähiten muodonmuutosenergiaa. Kaksoissymmetrisessä sauvassa se on taivutusnurjahdus heikommassa suunnassa, jolloin molemmat laipat taipuvat samaan suuntaan identtisesti. (13, s. 73.)

Kuvassa 19 on laskettu eri aksiaalisesti kuormitettujen sauvojen taivutusnurjahduskestävyyksiä pääakselin suhteen, saman kokoluokan poikkileikkauspinta-alalla, eurokoodin 1993-1-1 mukaan. L-, U- ja T-poikkileikkauksille tulee tarkastaa lisäksi muut nurjahdusmuodot, mutta jo pelkkää taivutusnurjahdusta tarkastelemalla nähdään, että putkiprofiileilla on muita poikkileikkauksia hieman parempi nurjahduskestävyys.



Kuva 19. Poikkileikkausten taivutusnurjahduskestävyyksiä

Aksiaalisesti kuormitetun sauvan mitoituksen kannalta kaksoissymmetristen poikkileikkausten käytöstä on etua, kun nurjahdusmuodoista ei tarvitse tarkastaa

kuin taivutusnurjahdus. Putkiprofiileilla on etua myös taivutusnurjahduksessa, koska profiilien materiaali sijaitsee kaukana poikkileikkauksen keskipisteestä (12, s. 69).

5.3.2 Taivutetut sauvat

Rakennemallissa 1 taivutettuna sauvana on vain kiinnityskisko, ja rakennemallissa 2 taivutukselle menee kisko ja paarresauva.

Kiinnityskiskona käytetään paljon C- ja U-profiileja ja muunlaisia kotelomaisia profiileja, jotka mahdollistavat aurinkopaneelien helpon asennettavuuden, eikä aurinkopaneelin leveydellä ole niin suurta merkitystä, koska kiinnityspala on asennettavissa kiskolle mihin tahansa. Näillä poikkileikkauksilla kiepahdus saattaa kuitenkin pienentää taivutuskestävyyttä.

Maatelineessä kisko tulee kahteen suuntaan taivutetuksi, jolloin putkiprofiilin käytöstä on etua, koska poikkileikkauksen sivunpituutta ja näin myös taivutuskestävyyttä voidaan kasvattaa helposti, eikä näillä poikkileikkauksilla kiepahdus yleensä pienennä sauvan kestävyyttä.

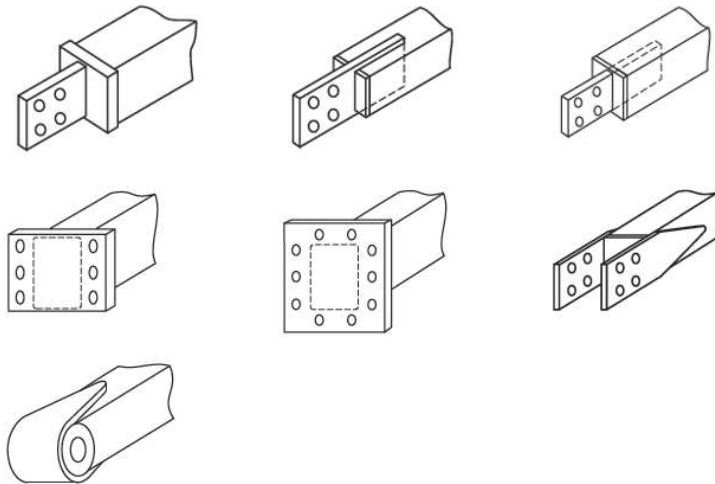
5.4 Liitokset

Maateline on pystyttävä kuljettamaan helposti työmaalle, joten liian suurien kokoonpanojen käyttöä ei voi käyttää, vaan liitokset on hyvä toteuttaa pääasiassa ruuviliitoksilla. Täysin hitsien välttäminen voi olla hankalaa tai epäedullista. Käytettäessä hitsiliitoksia on levyosille ja rakenneputkille annettu paksuusvaatimuksia, jotka täyttämällä voidaan käyttää standardissa 1993-1-8 annettuja ohjeita. Levyosien vähimmäispaksuus on 4 mm ja rakenneputkien vähimmäispaksuus on 2,5 mm. (15, s. 41.)

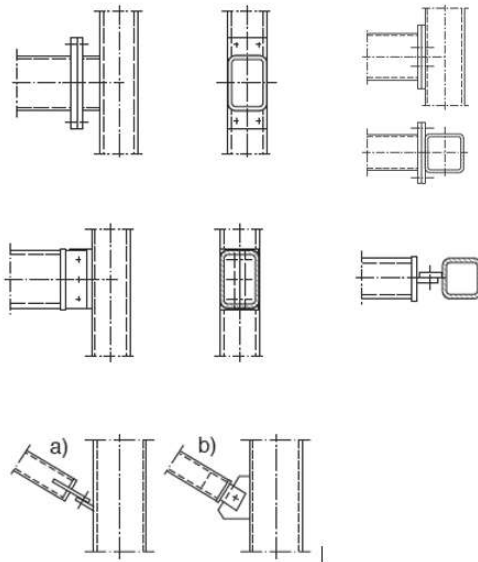
5.4.1 Aksiaalisesti kuormitetut sauvat

Rakenneputkien liitokset toteutetaan yleensä hitsaamalla tai ruuviliitoksilla, käyttämällä laippa-, korvake- tai puukkoliitoksia. Maatelineissä käytetään paljon kulmapala-, panta- ja erilaisten taivutettujen levyosien liitoksia. Kuvassa 20 on esitetty rakenneputkien tyypillisiä ruuviliitoksia ja kuvassa 21 on esitetty tyypillisiä palkin ja diagonaalin liitoksia pilariin.

Liitoksissa kannattaa koittaa välttää heikentämästä sauvan kestävyyttä esimerkiksi reikien vaikutuksesta ja kuormat on pyrittävä siirtämään mahdollisen keskeisesti, tai epäkeskeisyys on huomioitava mitoituksessa. Molemmissa valituissa rakennemalleissa tulee useampi sauva liitettäväksi samaan pisteeseen ja tämä on hyvä huomioida liitostyyppiä valitessa.



Kuva 20. Erilaisia rakenneputkien liitoksia (12, s. 209)



Kuva 21. Rakenneputken liitoksia pilariin (12, s. 230)

Kuvien 20 ja 21 tyyliisissä laippaliitoksissa kestävyyttä voidaan helposti kasvattaa levypaksuuksia ja ruuvimääriä muuttamalla, mutta maatalineen rasitusten kanssa

voivat johtaa helposti ylimitoitukseen ja usean sauvan liittäminen samaan kohtaan on hankalaa. Ruuvien sijaitessa liitettävän sauvan keskilinjan ulkopuolella laippaliitos vaatii vähintään kaksi ruuvia pilariin liittymisen lisäksi, jotta kuorma saadaan siirrettyä keskeisesti.

Kuvassa 22 näkyy tyypillinen liitos, jossa on käytetty taivutettua levyosaa. Tämänlainen liitos voi kuitenkin heikentää parresauvan kestävyyttä ja liitoskohdan osuessa kiinnityskiskon liitoksen kanssa samaan kohtaan voi levyosaa joutua turhaan kasvattamaan, jotta kiinnitys saadaan toteutettua. Ongelmia voi tulla myös ruuvilla sauvan päähän liittymissä, kun sauvaksi voidaan joutua valitsemaan suurempi koko, jotta vaaditun kokoinen reikä saadaan toteutettua. Hyvänä puolena tällaisessa liitoksessa on hitsien puuttuminen.

Kuvan 21 alimmaisten liitosten kaltaisissa liitoksissa usean sauvan liittäminen onnistuu hyvin, kun pilariin kiinnitettävää levyosaa voidaan tuoda ulospäin ja liitokseen saadaan lisää tilaa. Tällaisessa liitoksessa voidaan myös kestävyyttä kasvattaa tai pienentää, levyosien paksuuksia muuttamalla, myös ruuvien kokoa, lukumäärää ja hitsien pituuksia voidaan muuttaa melko vapaasti. Huonona puolena on vaadittu sauvan loveaminen ja hitsien määrä.

Liitoksissa tulee huomioida, että jos rakenteen osat tulee sinkitä, pitää sinkitykselle jättää valutusreiät. Pannat soveltuvat pyöreille putkiprofiileille, kun taas sauvan kylkeen hitsatut levyosat ovat hankalampia toteuttaa pyöreillä putkillla.



Kuva 22. Maatelineen runko (1)

5.4.2 Kiinnityskisko

Kiinnityskiskon liitos parresauvaan toteutetaan useasti ruuviliitoksin, joko kulmapalalla tai kiskon poikkileikkaukseen kuuluvien laippojen avulla. Jotta parresauvan kestävyyttä ei pienennettäisi, reikien myötä, voidaan liitoksessa käyttää hitsejä. Paarteeseen voidaan hitsata esimerkiksi joko kulmapalat tai laippaliitoksen tyylinen levyosa. Laippaliitos voidaan toteuttaa käyttämällä vain yhtä levyosaa, kun ruuvit viedään kiskon läpi. Tämä vaatii kuitenkin kulmapalakiinnitykseen verrattaessa pidemmät ruuvit ja niin myös vaadittujen reikien lukumäärä kasvaa. Paarteen päälle hitsattava kulmapala kiinnitys kannattaa toteuttaa kahdella, kiskon molemmalle puolelle tulevalla osalla, jolloin ruuvi ei mene taivutukselle. Tämä voi vaatia kuitenkin laippaliitosta suuremmat hitsit.

Yhdenlainen yleinen sauvojen liitostapa on alumiiniprofiileilla käytetty ruuviliitos, jossa parresauvan poikkileikkauksessa on säädön salliva huullos, kuten kuvassa 23.

Kiskojen jatkamiselle käytetään useimmiten jatkoskohdan molemmille puolille tai kiskon sisään ruuviliitoksin kiinnitettäviä levyosia tai putkea.



Kuva 23. Alumiinisten sauvojen ruuviliitos (1)

5.5 Jäykistys

Standardissa 1991-1-6 annetaan suositusarvoja asennuksen aikaiselle kuormitukselle. Henkilöille ja käsityökaluille on tasaisen ominaispystykuorman suositusarvoksi annettu 1 kN/m^2 ja vaakakuormaksi jäykistykselle 3 % tästä pystykuormasta. (16, s. 38 ja s. 44.)

Tällöin jäykistyskuormaksi saadaan asennustyön, tuulenpaineen ja tuulen kitkan aiheuttama yhteisvaikutus. Tarkasteltujen rakennemallien sivuttainen tuulenpaineen projektiopinta-ala ja tuulen kitkan vaikutukset ovat kuitenkin niin pieniä, että jäykistyskuormalle kannattaa valita minimiarvo, jolloin voidaan olla varmoja jäykistyksen riittävydestä.

Teräsrungon jäykistykselle voidaan käyttää seuraavia menetelmiä tai niiden yhdistelmiä:

- levyjäykistys
- kehäjäykistys
- mastojäykistys
- ristikkojäykistys.

Teräsrakenteissa käytetään yleisimmin ristikko- ja kehäjäykistystä (13, s. 117).

Levyjäykistystä käytetään yleensä rakennuksissa ja rakenteissa, joissa on runkoon kuuluvia jäykkiä vaaka- tai pystytasoja, joita voidaan useasti käyttää jäykistykseen. Maatelineessä levyjäykistysenä voitaisiin käyttää muotolevyä. Levyjäykistyskäyttö vaatii kuitenkin suuren tuulenpaineelle alttiin levyn, jolloin levyn saattaa mitoittavaksi tekijäksi voi muodostua tuulenpaine eikä jäykistyskuorma.

Kehäjäykistyksessä pilarien ja palkkien väliset liitokset tehdään ainakin osittain jäykiksi, jolloin pilarilinjojen muodostavat kehät toimivat jäykistysnä. Kehäjäykistyskäytön vaatimat momenttijäykät liitokset voivat olla kalliita ja hankalia toteuttaa.

Mastojäykistyksessä pilarit ovat liitetty perustuksiin jäykästi, jolloin pilarit toimivat ulokepalkin tavoin ja palkit liitetään pilareihin nivelellisesti. Ruuvipaalun käyttö mastojäykistyksessä on kuitenkin hankalaa.

Ristikkojäykistyksessä vaakakuormat siirretään perustuksille diagonaalisauvoilla ja/tai erilaisilla siteillä. Tämä voidaan toteuttaa puristetuilla ja/tai vedetyillä sauvoilla tai vetotangoilla. Ristikkojäykistys vaatii kuitenkin joko kaksi vedettyä sauva molemmille sivuille tai puristussauvan. Puristussauvan ollessa pitkä voi se vaatia suuren poikkileikkauksen, jottei nurjahdusta pääse tapahtumaan.

Rakennemallia valittaessa tavoitteena oli mahdollisimman vähän taivutettuja sauvoja, jolloin on luonnollista valita jäykistysjärjestelmä, joka ei aiheuta taivutusta rakenteisiin. Ristikko- ja levyjäykistykset eivät aiheuta taivutusmomenttia sauvoihin, toisin kuin kehä- ja mastojäykistys. Ristikkojäykistyskäyttö on luontevaa rakenteissa, joissa on muutenkin ristikoita, jolloin jäykistykseen voidaan käyttää muussakin rakenteessa käytetyn kaltaisia sauvoja ja liitoksia.

5.6 Pintakäsittely

Korroosiossa teräksen valmistuksessa metalliin varastoituminen energia vapautuu ja metalli pyrkii palautumaan luonnolliseen tilaansa. Teräsrakenteiden yleisimpiä menetelmiä korroosionsuojaukselle ovat maalaus ja kuumasinkitys tai materiaalina käytetään säänkestävää tai ruostumatonta terästä. Pinnoituksella voidaan estää myös eri materiaalien sähkökemiallinen korroosio. (12, s. 519; 13 s. 161 ja 163.)

Sinkityksen etuna maalaukseen verrattuna on sen kyky suojata terästä naarmuuntuessakin. Sinkitys suojaa paljastunutta teräspintaa katodisesti eli syöpyen teräksen sijasta. Maalauksen toimivuuden kannalta pinnan tiiveys on tärkeää, jos pinnoite rikkoontuu tai jos pinnoite läpäisee kosteutta ja ilmaa korroosio pääsee etenemään pinnoitteen alla. Korroosionsuojausmaalattuja rakenteita on varoitava vahingoittamasta varastoinnin, kuljetuksen ja asennuksen aikana. Vahingoittunut pinnoite on paikkamaalattava. (13, s. 164.)

Pinnat esikäsitellään standardin SFS-EN ISO 12944-4 mukaisesti, taulukossa 9 on esitetty nämä esikäsitelyasteet. Yleisin esikäsitelyaste maalaukselle on Sa 2 ½, ja kuumasinkityksen esikäsitelystä käytetään happopeittausta. Teräsharjaukseen käytetään asennustyömaalla tehtävien hitsauksien yhteydessä, hitsauksen jälkeen pinta on puhdistettava ja paikkamaalattava. (12, s. 520.)

Standardi esikäsittely- aste ¹⁾	Esikäsittely- menetelmä	Edustavat valokuvaesimerkit standardissa ISO 8501-1 ^{2) 3) 4)}	Esikäsittelyjen pintojen olennaiset ominaisuudet: Lisätietoja käsittelyistä ennen pinnan esikäsittelyä ja sen jälkeen (sarake 2), ks. ISO 8501-1.	Soveltumisalue
Sa 1	Suihkupuhdistus (6.2.3)	B Sa 1 C Sa 1 D Sa 1	Irtonainen valssihilse, ruoste ja maalipinnoitteet sekä vieras aines on poistettu. ⁵⁾	Pintojen esikäsittely a) pinnoittamattomat teräspinnat; b) pinnoitetut teräspinnat, jos pinnoitetta poistetaan siinä määrin, että määritelty puhtausaste saavutetaan. ⁶⁾
Sa 2		B Sa 2 C Sa 2 D Sa 2	Suurin osa valssihilsestä, ruosteesta, maalipinnoitteista ja vierasta aineesta on poistettu. Jäljellejäävien epäpuhtauksien on oltava tiukasti kiinni alustassa.	
Sa 2½		A Sa 2½ B Sa 2½ C Sa 2½ D Sa 2½	Valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aines on poistettu. Jäljellejäävien epäpuhtausjäämien tulee näkyä ainoastaan lievänä täplien tai raitojen muotoisena värjäntymisenä.	
Sa 3 ⁷⁾		A Sa 3 B Sa 3 C Sa 3 D Sa 3	Valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aines on poistettu. Pinnan on oltava kauttaaltaan metallin värinen.	
St 2	Puhdistus käsityökaluilla tai koneellisesti (6.2.1, 6.2.2)	B St 2 C St 2 D St 2	Irtonainen valssihilse, ruoste ja maalipinnoitteet sekä vieras aines on poistettu. ⁵⁾	
St 3		B St 3 C St 3 D St 3	Irtonainen valssihilse, ruoste ja maalipinnoitteet sekä vieras aines on poistettu. ⁵⁾ Pinta on kuitenkin käsiteltävä hyvin paljon huolellisemmin kuin esikäsittelyasteessa St 2, jotta pintaan saataisiin metallialustan mukainen hohde.	
FI	Liekkipuhdistus (6.3)	A FI B FI C FI D FI	Irtonainen valssihilse, ruoste ja maalipinnoitteet sekä vieras aines on poistettu. Jäljellejäävien epäpuhtausjäämien tulee näkyä ainoastaan lievänä pinnan värjäntymisenä (eri värien sävyjä).	⁶⁾
Be	Happopeittaus (6.1.8)		Valssihilse, ruoste ja maalipinnoitejäämät on poistettu täydellisesti. Maalipinnoitteet on poistettava sopivalla menetelmällä ennen peittautta.	Esimerkiksi ennen kuumasinkitystä.

¹⁾ Käytetyt lyhenteet:
Sa = suihkupuhdistus (ISO 8501-1)
St = puhdistus käsityökaluilla tai koneellisesti (ISO 8501-1)
FI = liekkipuhdistus
Be = happopeittaus

²⁾ A, B, C, D kuvaavat pinnoittamattoman teräspinnan alkuperäistä kuntoa (ks. ISO 8501-1).

³⁾ Edustavissa valokuvaesimerkeissä esitetään ainoastaan pintoja tai pinta-aloja, jotka olivat aikaisemmin pinnoittamattomia.

⁴⁾ Kun kysymyksessä ovat maalaamattomat tai maalatut teräksellä olevat metallipinnoitteet, voidaan sopia tiettyjen vakioesikäsittelyasteiden vastaavasta soveltamisesta edellyttäen, että nämä ovat teknisesti toteutettavissa kyseisissä olosuhteissa.

⁵⁾ Valssihilseen katsotaan olevan tiukasti kiinni, jos sitä ei saada poistettua pyörästetyllä kittausveitsellä nostamalla.

⁶⁾ Arvioitiin vaikuttaviin tekijöihin on kiinnitettävä erikoista huomiota.

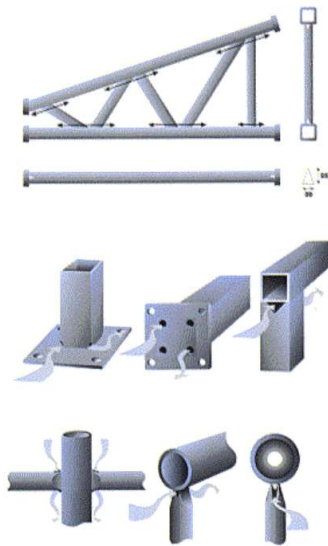
⁷⁾ Tämä pinnan esikäsittelyaste voidaan saavuttaa ainoastaan määrättyissä olosuhteissa, joita kenties ei ole mahdollista saavuttaa rakennuspaikalla.

Taulukko 9. Pinnan täydellisen esikäsittelyn standardiesikäsittelyasteet (17, s. 24)

5.6.1 Kuumasinkitys

Kuumasinkityksessä avoimet kotelorakenteet tulee varustaa valutus- ja ilmanpoistoaukoilla, jotta liuokset ja sinkki pääsevät poistumaan rakenteesta. Rakenteen sisään jäädessä vettä voi aiheutua räjähdysvaara, sinkityksen yhteydessä veden höyrystyessä nopeasti. Rakenteessa tulee välttää myös taskuja, joihin voi

kertyä ylimääräistä sinkkiä. Kuvassa 24 on esitetty mahdollisia valutusaukkoja putkiprofiilirakenteissa. Rakenneputkien sisäpintoja ei tarvitse suojata, jos rakenteet ovat kuivia ja hermeettisesti suljettuja. Mikäli rakenneputket altistuvat täysin säälle, joka voi aiheuttaa kondensoitumista, eivätkä ole hermeettisesti suljettuja tulee harkita sisä- ja ulkopintojen suojausta. (13, s. 164–165; 18, s. 14.)



Kuva 24. Mahdollisia valutus- ja ilmanpoistoaukkoja (18)

Sinkkipinnoitteen elinikä on suoraan verrannollinen sen paksuuteen. Standardissa SFS-EN ISO 14713-1 annetaan suunnitteluperusteita sinkkipinnoitukselle ja standardissa 14713-2 annetaan ohjeita kuumasinkitykseen. Taulukossa 10 on esitetty ilmasto-olosuhteiden kuvaukset ja syövyttävyyssluokat ja kuvassa 25 on esitetty sinkkipinnoitteen kestoikä eri ympäristöolosuhteissa.

Syövyttävyyssluokka C Sinkin korroosionopeus (perustuen yhden vuoden altistukselle), r_{corr} ($\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$) ja korroosion taso	Tyypilliset ympäristöt (esimerkkejä)	
	Sisäilma	Ulkoiima
C1 $r_{corr} \leq 0,1$ Erittäin pieni	Lämmitetyt tilat, joissa on pieni suhteellinen kosteus ja saasteiden määrä merkityksetön, esim. toimistot, koulut, museot	Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa hyvin vähän saasteita ja kosteutta, esim. tietyt aavikot, keskinen arktinen alue/Etelämannen
C2 $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$ Pieni	Lämmitämättömät tilat, joiden lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihtelevat. Harvoin tapahtuvaa kondensoitumista ja vähäinen saasteiden määrä, esim. varastot, urheiluhallit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa vähän saasteita ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), esim. maaseutu, pienet kaupungit. Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa lyhytaikaisesti kosteutta, esim. aavikot, subarktiset alueet
C3 $0,7 < r_{corr} \leq 2$ Keskimääräinen	Tilat, joissa kohtalaisesti kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa kohtalaisesti saasteita ($\text{SO}_2: 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tai vähäinen kloridien vaikutus, esim. kaupunkialueet, rannikkoalueet, joissa pieniä määriä klorideja, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa vähän saasteita
C4 $2 < r_{corr} \leq 4$ Suuri	Tilat, joissa paljon kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. teollisuuslaitokset, uimahallit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa paljon saasteita ($\text{SO}_2: 30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tai huomattava kloridien vaikutus, esim. saastuneet kaupunkialueet, teollisuusalueet, rannikkoalueet, joissa ei ole merivesiroiskeita, altistuminen jäänsulatus-suoloille, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa kohtalaisesti saasteita
C5 $4 < r_{corr} \leq 8$ Erittäin suuri	Tilat, joissa erittäin runsaasti kondensaatiota ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. kaivokset, teollisiin tarkoituksiin rakennetut luolat, ilmastoimattomat hallit subtrooppisilla ja trooppisilla vyöhykkeillä	Lauhkeat ja subtrooppiset vyöhykkeet, ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita ($\text{SO}_2: 90 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja/tai merkittävä kloridien vaikutus, esim. teollisuusalueet, rannikkoalueet, katetut tilat rannikolla
CX $8 < r_{corr} \leq 25$ Äärimäinen	Tilat, joissa lähes pysyvää kondensaatiota tai pitkiä altistumisia äärimäiselle kosteudelle ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. ilmastoimattomat hallit kosteilla trooppisilla vyöhykkeillä yhdessä ulkoilman saasteiden sekä ilmassa olevien kloridien ja korroosiota kiihdyttävien hiukkasten kanssa	Subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet (erittäin pitkiä aikoja kosteutta), ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita (SO_2 yli $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mukaan lukien tuotantoprosessien saasteet ja/tai voimakas kloridien vaikutus, esim. äärimäiset teollisuusalueet sekä rannikko- ja offshore-alueet, joissa ajoittaisia merivesiroiskeita

HUOM. 1 Kloridien määrä rannikkoalueilla riippuu voimakkaasti merivedessä olevan suolan kulkeutumiseen vaikuttavista tekijöistä, kuten tuulen suunnasta ja nopeudesta, maaston muodoista, tuulelta suojaavista saarista, etäisyydestä mereltä jne.

HUOM. 2 Äärimäistä kloridien vaikutusta, joka on tyypillistä merivedelle tai voimakkailla merivesiroiskeilla, ei käsitellä standardissa ISO 9223.

HUOM. 3 Tietyn käyttöolosuhteen syövyttävyyssluokkia, esim. kemianteollisuudessa, ei käsitellä standardissa ISO 9223.

HUOM. 4 Katetut ja sadevedeltä suojatut pinnat meriympäristössä, jossa on läsnä klorideja, voivat altistua suuremmalle syövyttävyyssluokalle johtuen kosteutta sitovista suoloista.

HUOM. 5 Ympäristöissä, joiden oletettu syövyttävyyssluokka on CX, suositellaan ilmasto-olosuhteiden syövyttävyys luokittelemaan yhden vuoden korroosiohavaintojen perusteella. Standardi ISO 9223 on uusittavana; luokka CX tullaan sisällyttämään uuteen painokseen.

HUOM. 6 Rikkidioksidin (SO_2) pitoisuus olisi määriteltävä vähintään yhden vuoden ajalta ja esitettävä vuotuisena keskiarvona.

HUOM. 7 Yksityiskohtaiset kuvaukset sisäilmastoista syövyttävyyssluokissa C1 ja C2 esitetään standardissa ISO 11844-1. Sisäilmaston syövyttävyyssluokat IC1...IC5 on määritelty ja luokiteltu.

HUOM. 8 Luokittelukriteeri perustuu korroosionopeuksien määrittelyyn vakiokoekappaleilla syövyttävyyden arvioimiseksi (ks. standardi ISO 9226).

HUOM. 9 Paksuushavaintojen arvot vastaavat standardissa ISO 9223 määriteltyjä, paitsi arvoilla vähintään $2 \mu\text{m}$ (per vuosi), jotka on pyöristetty kokonaisluvuiksi.

HUOM. 10 Vertailumateriaalina käytetty sinkki on määritelty standardissa ISO 9226.

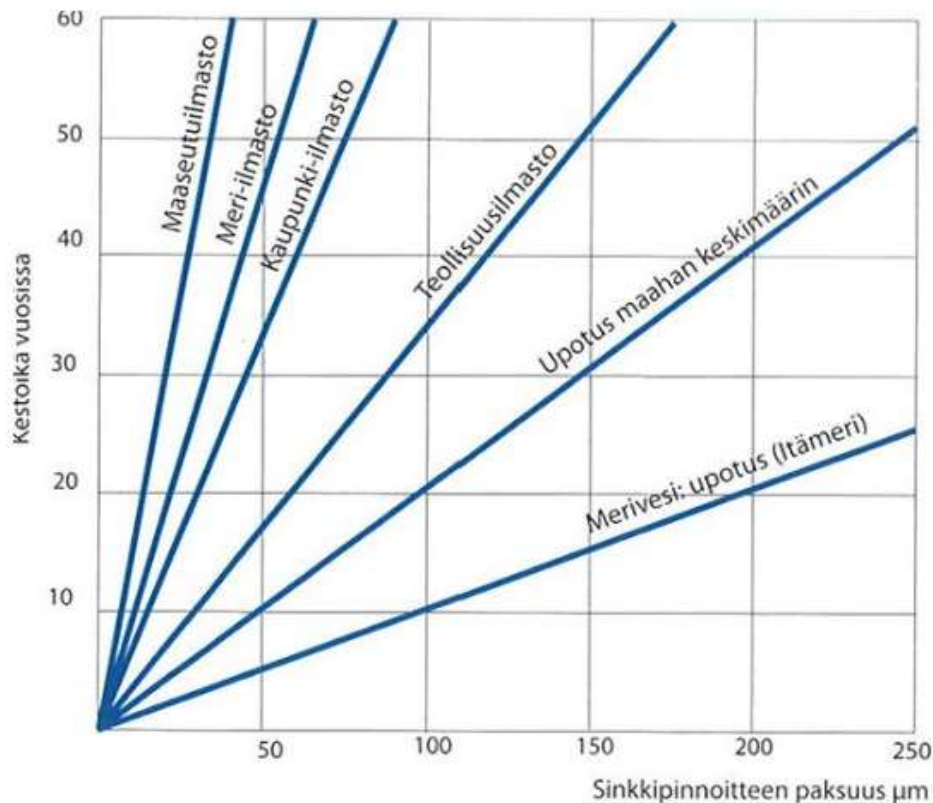
HUOM. 11 Luokan C5 ylittävien korroosionopeuksien katsotaan olevan äärimäisiä. Syövyttävyyssluokka CX viittaa tiettyyn meri- ja meriteollisuusympäristöön.

HUOM. 12 Ensiolettamuksena pidetään kaikkien sinkkimetallipintojen korroosiota samana kyseisessä ympäristössä. Rauta ja teräs syöpyvät yleensä 10...40 kertaa sinkkiä nopeammin, suurimpien syöpymisnopeuksien ollessa yleensä runsaasti klorideja sisältävässä ympäristöissä. Arvot ovat levymäisillä näytteillä saatuja standardien ISO 9223 ja ISO 9224 mukaisesti.

HUOM. 13 Ilmastollisissa olosuhteissa tapahtuu muutoksia ajan kuluessa. Useilla alueilla saasteiden pitoisuudet (erityisesti SO_2) ilmassa ovat pienentyneet ajan kuluessa. Tämä on johtanut näiden alueiden syövyttävyyssluokan alentumiseen. Tämä on puolestaan johtanut aiempaa pienempiin sinkkipinnoitteiden korroosionopeuksiin verrattuna historiallisiin arvoihin. Toisille alueille on tullut lisääntyviä saasteita ja teollista toimintaa ja siksi näiden ympäristöjen syövyttävyyssluokka voi olla suurentunut.

HUOM. 14 Sinkki- ja sinkki-rautaseospinnoitteiden korroosionopeudet ovat suunnilleen samoja.

Taulukko 10. Tyypillisten ilmasto-olosuhteiden kuvaus ja syövyttävyyssluokat (19, s.20)



Kuva 25. Sinkkipinnoitteen kestoikä eri ympäristöolosuhteissa (18)

5.6.2 Korroosionestomaalaus

Maalauksen menetelmänä käytetään normaalisti ruiskumaalausta ja sivellin- ja telamaalausta käytetään lähinnä paikkamaalauksessa. Rakenteet tulisi suunnitella siten, että ruiskumaalaus on mahdollista toteuttaa. (12, s. 524.)

Opastavia taulukoita korroosionestomaalaukseen eri rasitusluokille on esitetty standardin 12944-5 liitteessä A. Sopivan maaliyhdistelmän valitsemiseksi voidaan käyttää myös maalivalmistajien taulukoita. Maaliyhdistelmiä on lukematon määrä ja niitä tulee lisää kehityksen myötä. Siksi niitä ei ole esitetty tässä työssä. Ympäristörasitusluokat on esitetty taulukossa 11.

Rasitus- luokka	Painohäviö pinta-alayksikköä kohden/paksuushäviö (ensimmäinen koestusvuosi)				Esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä lauhkeassa ilmastossa (vain opastava)	
	Niukkahiilinen teräs		Sinkki		Ulkona	Sisällä
	Painohäviö g/m ²	Paksuus- häviö µm	Painohäviö g/m ²	Paksuus- häviö µm		
C1 hyvin lievä	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	–	Lämmitetyt rakennukset, joissa puhtaasti ilmatilat, esim. toimistot, kaupat, koulut, hotellit.
C2 lievä	> 10...200	> 1,3...25	> 0,7...5	> 0,1...0,7	Ilmatilat, joissa epäpuhtauksien määrä on alhainen. Enimmäkseen maaseutualueita.	Lämmittämättömät rakennukset, joissa voi esiintyä kondensoitumista, esim. varastot, urheiluhallit.
C3 kohtalainen	> 200...400	> 25...50	> 5...15	> 0,7...2,1	Kaupunki- ja teollisuusilmatilat, joissa kohtalainen rikkidioksidikuormitus. Rannikkoalueet, joilla alhainen suolapitoisuus.	Tuotantotilat, joissa korkea kosteuspitoisuus ja jossain määrin epäpuhtauksia ilmassa, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit.
C4 ankara	> 400...650	> 50...80	> 15...30	> 2,1...4,2	Teollisuusalueet ja rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus on kohtalainen.	Kemianteollisuuden tuotantolaitokset, uima-altaat, rannikolla sijaitsevat telakat ja veneveistämöt.
C5-I hyvin ankara (teollisuus)	> 650...1500	> 80...200	> 30...60	> 4,2...8,4	Teollisuusalueet, joilla kosteus on korkea ja ilmatila on syövyttävä.	Rakennukset tai alueet, joilla kondensoituminen on miltei jatkuva ja saasteiden määrä korkea.
C5-M hyvin ankara (meri)	> 650...1500	> 80...200	> 30...60	> 4,2...8,4	Rannikkoalueet ja rannikon ulkopuoliset alueet, joilla suolapitoisuus on korkea.	Rakennukset tai alueet, joilla kondensoituminen on miltei jatkuva ja saasteiden määrä korkea.
HUOMAUTUKSIA 1 Rasitusluokissa käytetyt häviöarvot ovat yhtäpitävät standardin ISO 9223 arvojen kanssa. 2 Kuumien ja kosteiden vyöhykkeiden rannikkoalueilla paino- ja paksuushäviöt voivat ylittää luokan C5-M rajat. Suojamaaliyhdistelmän valintaan on kiinnitettävä erityisesti huomiota.						

Taulukko 11. Ilmastorasitusluokat ja esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä (21, s. 12)

Maalauksella on käytännössä joidenkin maaliyhdistelmien kestävyys paljon pidempi kuin 15 vuotta, ja joissakin tapauksissa on todennettua kokemusta jopa yli 25 vuoden kestävydestä. Maaliyhdistelmän kestävyttä voidaan kasvattaa kuivakalvon kokonaispaksuutta kasvattamalla ja käyttämällä vaativamman luokan maaliyhdistelmiä. (21, s. 28.)

Rakenneputkien sisäpuolinen maalaus ei ole käytännössä mahdollista. Sisäpuolisen maalauksen tarve voidaan kuitenkin poistaa sulkemalla rakenneputkien päät ja varmistamalla, että sadevesi ei voi päästä rakenneputken sisälle. Tätä ei ole kuitenkaan aina käytännössä mahdollista toteuttaa. (14, s. 522.)

5.7 Perustukset

Perustukset kannattaa valita maaperän ja tuulikuormien mukaan tapauskohtaisesti. Ruuvipaalut kestävät paremmin koheesiomaassa mutta kivinen maaperä ja yksi ylimääräinen sauva ja tämän liitokset voivat suosia betonia. Suurilla tuulikuormilla painovaatimukset betoniselle perustukselle voivat kuitenkin kasvaa todella suuriksi. Ruuvipaalun käytössä on etuna rakenteen keveys, jolloin ruuvipaalun käyttö on hyvä vaihtoehto heikosti kantavilla maa-alueilla.

Teline kannattaa pyrkiä perustamaan mahdollisimman matalaksi, jolloin kaatavien momenttien varren saadaan mahdollisimman pieniksi. Betoniperustusta käytettäessä kannattaa mieluummin kasvattaa perustuksen leveyttä. Betoniperustukselle voidaan käyttää myös kahta yksittäistä laattaa telineen jalkojen alla. Tällöin tulee kuitenkin huomioida, ettei rakennemalli muutu, vaan kummankin jalan on pysyttävä sivusiirtymättömänä. Kuvassa 26 on esitetty yhdenlainen betoniperustuspalkki.



Kuva 26. Betoniperustus (22)

Telineen liittämiseksi perustukseen on hyvä valita liitostyyppi, joka soveltuu molemmille, ruuvipaalulle ja betoniselle perustukselle. Maatelineissa käytetään useasti tähän soveltuvaa laippaliitosta. Kuvassa 27 on esitetty ruuvipaalun liitoskappale, johon telineen laippa saadaan kiinnitettyä ja kuvassa 28 on esitetty ruuvipaalu. Ruuvipaaluja on saatavilla useampi laippaisena ja monella eri pituudella.



Kuva 27. Ruuvipaalun liitososa (23)



Kuva 28. Ruuvipaalu (23)

6 Yhteenveto ja pohdinta

Rakennemalleista edullisemmaksi osoittautui vaihtoehto 2. Sen materiaalimenekki on pienempi, kuin vaihtoehdon 1, eikä yhden sauvan poisto ja yksittäisten sauvojen rasiusten kasvaminen vaatinut vahvempia poikkileikkauksia, pois lukien taivutettu paarresauva jonka kokoa jouduttiin kasvattamaan momenttikestävyyden vuoksi. Sauvojen ja kiinnityskiskon poikkileikkauksiksi valittiin RHS- ja SHS-profiilit. Näistä poikkileikkauksista löytyy paljon eri kokoja, jolloin sauvojen kestävyttä pystytään muuttamaan vastaamaan lumi- ja tuulikuormien aiheuttamia rasituksia. Telineiden tuuli- ja lumikuormat vaihtelevat kuitenkin niin paljon asennusalueiden mukaan, että pelkän sauvan poikkileikkauksen koon tai materiaalivahvuuden muutos ei välttämättä ole tehokkain keino, vaan tällöin on hyvä uudelleen tarkastella rakenteen mallia, sauvojen poikkileikkauksia ja materiaalia. Rakenteen mallia on myös vielä mahdollista viilata solmupisteiden sijainteja siirtämällä, jolloin rasituksia voitaisiin saada pienennettyä ja tasattua sauvojen kesken, käytetyillä ohjelmilla kuitenkin rakennemallin ja rasituslaskennan muokkaus on työlästä. Työn rakenne soveltuu käytettäväksi myös 8 ja 16 paneelin telineenä.

Rasitukset kuitenkin vielä pieniä ja sauvat pitkiä, joilla nurjahdus pienentää sauvojen kestävyttä huomattavasti. Telineelle voisi tutkia edullisempaa ratkaisua muuttamalla telineen mallia staattisesti määräämättömäksi ja poistaa rakenteesta ainakin yksi sauva ja valita nykyisten tilalle isommat sauvat, jolloin mitoituksesta tulee työläämpää, mutta materiaalimenekkiä, asennuksen ja konepajan työmäärää ja liitoksien lukumäärää voitaisiin saada karsittua.

Liitokset pyrittiin toteuttamaan siten että kuormat saadaan siirrettyä keskeisesti perustuksille ja sauvojen taivutusta välttämällä. Liitoksiksi valitut korvakeliitokset täyttävät hyvin nämä vaatimukset, eikä liitosvalinnoilla aiheutettu lisärasituksia rakenteelle. Liitoksissa kustannuksia pystytään karsimaan, rasiusten muuttuessa, levyosien paksuutta ja ruuvien kokoa pienentämällä. Liitokset jouduttiin kuitenkin osittain ylivoimittamaan, kun kuormien välitykseen olisi riittänyt pienemmät hitsien pituudet ja eurokoodin minimimittavaatimukset olivat suuremmat.

Jäykistykselle valittiin samanlaiset sauvat ja liitokset kuin rakenteen diagonaaleissa. Näillä saatiin muun rakenteen tyyliin liitososat ja sauvat tehokkaasti hyödynnettyä. Jäykistyskuormana käytettiin yksinkertaistettua minimiarvoa, jota voisi mahdollisesti vielä pienentää ja jäykistyssauvan tilalle voisi tutkia erilaisten vaijeriden käyttöä, joka voisi olla edullinen ratkaisu. Tarkastamalla jäykistyskuorma eri kuormitusyhdistelmien kanssa ei tarvitse välttämättä välittää jäykistyksen liitoskohdan osumisesta, ideaaliristikon tyyliin nivelpisteeseen, vaan liitoskohta voitaisiin siirtää muualle sauvaan ja näin pienentää sauvan tai vaijerin pituutta ja tarvittaessa lisätä tilaa rungon liitoskohtiin. Nykyisessä rakenteessa matalamman puolen jäykistyssauvaa jouduttiin nostamaan solmukohdasta hieman ylemmäs, mutta tämä aiheuttanut suuria muutoksia rasituksiin, eikä vaatinut muutoksia rakenteeseen.

Alumiinin käyttöä kannattaa tarkastella, sillä anodisoidulla alumiinilla on hyvä sään ja korroosion kesto. Vaikkakin alumiinin lujuuden myötöraja ja kimmokerroin ovat terästä pienempiä, varsinkin puristettuna sauvana alumiiniprofiilin käyttö voisi olla viisasta, koska puristetun sauvan mitoittavana tekijä on nurjahdus, alumiinin terästä heikompi myötölujuus voi vaatia suuremman sauvan, jolla nurjahdus ei välttämättä pienennä puristuskestävyyttä ja näin voidaan saada sauvat tehokkaammin hyödynnettyä.

Kuvat

- Kuva 1. Maateline kahdella jalalla, s. 7
Kuva 2. Maateline yhdellä jalalla, s. 7
Kuva 3. Maastoluokat, s. 10
Kuva 4. Toispuolisten maastonkohoumien sijaintikerroin s , s. 14
Kuva 5. Molempinpuolisten maastonkohoumien sijaintikerroin s , s. 14
Kuva 6. Nettopaineen kertoimien ja voimakertoimien arvot suoralle katokselle, s. 17
Kuva 7. Nopeuspainekorkeus ($z_e = h$) ja kuormaresultantin paikka suoralle katokselle, s. 18
Kuva 829. Kitkakuorman vaikutusala, s. 19
Kuva 9. Lumen ominaisarvot maan pinnalla, s. 21
Kuva 10. Lumikuorman muotokertoimet, s. 22
Kuva 11. Pulpettikaton muotokerroin, s. 22
Kuva 12. Paneelin kiinnikepala reunassa, s. 28
Kuva 13. Paneelien kiinnikepala paneelien välissä, s. 39
Kuva 14. T-pultti, s. 29
Kuva 15. Rakennevaihtoehto 1, s. 31
Kuva 16. Rakennevaihtoehto 2, s. 32
Kuva 17. Sauvojen suurimmat puristusvoimat, s. 32
Kuva 18. Maatelineissä käytettyjä poikkileikkauksia, s. 34
Kuva 19. Poikkileikkausten taivutusnurjahduskestävyyksiä, s. 35
Kuva 20. Erilaisia rakenneputkien liitoksia, s. 37
Kuva 21. Rakenneputken liitoksia pilariin, s. 37
Kuva 22. Maatelineen runko, s. 39
Kuva 23. Alumiinisten sauvojen ruuviliitos, s. 40
Kuva 24. Mahdollisia valutus- ja ilmanpoistoaukkoja, s. 44
Kuva 25. Sinkkipinnoitteen kestoikä eri ympäristöolosuhteissa, s. 46
Kuva 26. Betoniperustus, s. 48
Kuva 27. Ruuvipaalun liitososa, s. 49
Kuva 28. Ruuvipaalu, s. 49

Taulukot

- Taulukko 1. Tuulikuormien määrittämiseen tarvittavat laskentavaiheet ja eurokoodin luvut käsittely kohdille, s. 8
Taulukko 2. Maastoluokat ja μ -parametrit, s. 11
Taulukko 3. Tehollisen pituuden arvot, s. 14
Taulukko 4. Kitkakertoimet, s. 20
Taulukko 5. Lumikuorman muotokertoimet, s. 22
Taulukko 6. Kertoimien ψ arvot rakennuksille, s. 24
Taulukko 7. Seuraamusluokkien määrittely, s. 25
Taulukko 8. Kuormakertoimet seuraamus- ja luotettavuusluokille, s. 26
Taulukko 9. Pinnan täydellisen esikäsittelyn standardiesikäsittelyasteet, s. 43
Taulukko 10. Tyypillisten ilmasto-olosuhteiden kuvaus ja syövyttävyyssluokat, s. 45

Taulukko 11. Ilmastorasitusluokat ja esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä, s.
47

Lähteet

1. GreenEnergy Finland Oy. Julkaisematon materiaali.
2. Ground-Mount PV Racking Systems. Solarpro. <http://solarprofessional.com/articles/products-equipment/racking/ground-mount-pv-racking-systems#.WacVe9FLeUk>. Luettu 21.8.2017
3. Single-axis trackers. Soltec. <https://soltec.com/single-axis-solar-tracker/>. Luettu 30.8.2017.
4. SFS-EN 1991-1-4+AC+A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Vahvistettu 24.1.2011 Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
5. Ympäristöministeriö 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Rakenteiden kuormat. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. <http://eurocodes.fi/1991/Contents1991.htm>. Luettu 30.7.2017
6. RIL 201-1-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
7. Ympäristöministeriö 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Rakenteiden kuormat. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-3: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. <http://eurocodes.fi/1991/Contents1991.htm>. Luettu 30.7.2017
8. SFS-EN 1991-1-3+AC. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Vahvistettu 26.1.2004 Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
9. Ympäristöministeriö 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990. <http://eurocodes.fi/1990/contents1990.htm>. Luettu 30.7.2017
10. SFS-EN 1990+A1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Vahvistettu 26.6.2006 Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
11. Solar Mount Rail T bolt. Smartclima, <http://www.smartclima.com/solar-mount-rail-t-bolt.htm>. Luettu 27.8.2017.
12. Ongelin, P. & Valkonen, I. 2012. Ruukki Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Helsinki: Rautaruukki Oyj.
13. Kaitila, O., Kumar, R., Martikainen, L., Saarinen, E., Leskelä, M., Heinisuo, M., Inha, T., Kemppi, M., Yrjölä, P., Jyrkäs, K., Pekkinen, T. & Ilveskoski, O. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

14. RIL 90-1996, Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
15. SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Vahvistettu 15.8.2005. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
16. SFS-EN 1991-1-6. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-6: Yleiset kuormat. Toteuttamisen aikaiset kuormat. Vahvistettu 15.8.2005. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
17. SFS-EN ISO 12944-4. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 4: Pintatyypit ja pinnan esikäsittely. Vahvistettu 30.11.1998. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
18. Teräsrakenneyhdistys. http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/216/7cce5df/TRY_Kuumasinkitys.pdf. Luettu 27.8.2017.
19. SFS-EN ISO 14713-1. Sinkkipinnoitteet. Ohjeet ja suositukset rauta- ja teräsrakenteiden korroosionestoon. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet ja korroosionkestävyys. Vahvistettu 8.3.2010. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
20. SFS-EN ISO 14713-2. Sinkkipinnoitteet. Ohjeet ja suositukset rauta- ja teräsrakenteiden korroosionestoon. Osa 2: Kuumasinkitys. Vahvistettu 8.3.2010. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
21. SFS-EN ISO 12944-5. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 5: Suojamaaliyhdistelmät. Vahvistettu 25.3.2008. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
22. PvMax. Schletter. <http://www.schletter.ca/pvmax.html>. Luettu 28.8.17.
23. Materiaalipankki. Paalupiste Oy. <http://paalupiste.com/fi/hinnasto>. Luettu 28.8.2017